

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

2019

Ing. Marek Urban

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303V004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

DISERTAČNÍ PRÁCE

Zefektivnění výroby, měření a funkčnosti nesymetricky zatěžovaného ložiska v energetice

Autor: **Ing. Marek Urban**

Školitel: **prof. Ing. Katarína Monková, Ph.D.**

Konzultant specialista: **doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této disertační práce.

V Plzni dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Na této práci se v pozadí podílelo mnoho lidí a na tomto místě bych jim chtěl za to poděkovat. Bez nich by tato práce nevznikla, nebo vznikala za podstatně složitějších okolností.

Mé hlavní díky patří především vedení společnosti GTW Bearings v čele s Ing. Tomášem Skopečkem Ph.D. a majitelem společnosti Jiřím Šujancem, kteří byli hlavními iniciátory pro zahájení vývoje tohoto hi-tech produktu.

Děkuji lidem ze ZČU v Plzni, a to konkrétně mé školitelce prof. Ing. Kataríně Monkové Ph.D., mému konzultantovi doc. Ing. Jan Řehořovi Ph.D. a dále pánům prof. Ing. Antonínu Křížovi a Ing. Miroslavu Gombárovi, PhD. Všem těmto osobnostem chci poděkovat za příkladné vedení, zázemí, cenné poznámky, ale i věcnou kritiku, která je cennější než kdejaká pochvala.

Dále mé díky patří lidem ze společností DOOSAN Škoda Power, Howden ČKD Compressors, GTW Bearings, výzkumným organizacím NTC, RTI a lidem z katedry technologie obrábění a katedry materiálu a strojírenské metalurgie. Bez spojení těchto výzkumných organizací a tří silných výrobních společností by tato práce vznikala jen těžko.

Vývoj tohoto ložiska by se také neobešel bez externí finanční podpory. Touto cestou děkuji MPO a TAČRu.

V neposlední řadě chci poděkovat mé rodině v čele s mojí manželkou a také mým přátelům. Všem děkuji za jejich podporu a vřelá slova v době, kdy to se mnou místy opravdu neměli jednoduché :-).

DĚKUJI.

ANOTAČNÍ LIST DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Urban	Jméno Marek
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie-technologie obrábění	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Monková, Ph.D.	Jméno Katarína
DRUH PRÁCE	Disertační	
NÁZEV PRÁCE	Zefektivnění výroby, měření a funkčnosti nesymetricky zatěžovaného ložiska v energetice	

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	213	TEXTOVÁ ČÁST	100	GRAFICKÁ ČÁST	113
---------------	-----	---------------------	-----	----------------------	-----

ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>V této práci je řešena celková problematika technologičnosti konstrukce samo-vyrovnávacího ložiska s axiálními naklápěcími segmenty s ohledem na optimální funkčnost ložiska a efektivitu výroby ložiska.</p> <p>Po nalezení optimálního řešení vzešlého z experimentů byly navrženy prototypy, na kterých byly provedeny série komplexních testů v několika experimentálních zařízeních schopných simulovat reálný provoz. Ve všech experimentálních zařízeních vykazovaly všechny prototypy ložisek velice dobré hodnoty a vlastnosti těchto prototypů, zcela naplnili očekávání, která byla na začátku vývoje stanovena.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	Samo-vyrovnávací axiální kluzné ložisko, vahadlo, nitridace, niklování, energetika, technologičnost konstrukce.

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Urban	Name Marek
FIELD OF STUDY	Department of Machining Technology	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Monková, Ph.D.	Name Katarína
TYPE OF WORK	Dissertation	
TITLE OF THE WORK	Streamlining of manufacturing, measuring and functionality of un-symmetrically loaded bearing in energy sector	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	213	TEXT PART	100	GRAPHICAL PART	113
----------------	-----	------------------	-----	-----------------------	-----

BRIEF DESCRIPTION	<p>In this Ph.D thesis is solved complete problematic of technological design of self-equalizing thrust bearing with thrust pads with focus on optimal function and effectivity of manufacturing.</p> <p>After finding optimal solution resulting from experiments were designed and manufactured prototypes of self-equalizing thrust bearings. On these prototypes were performed series of experiments in devices where is capable simulation of real loading operation. In all experimental devices all bearings prototypes showed very good values and properties fulfilling expectations that were established at the beginning of the development.</p>
TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	
KEY WORDS	Self-equalizing thrust bearing, lever, nitridation, nickeling, energy sector, technological design.

OBSAH

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	22
Seznam zkratk, symbolů a značek veličin	24
Předmluva	27
1 Úvod.....	28
2 Rozbor současného stavu řešené problematiky	30
2.1 Axiální kluzné ložisko s naklápěcími segmenty – obecně	30
2.2 Axiální kluzné ložisko s naklápěcími segmenty a se samo-vyrovnávacími elementy 33	
2.2.1 Konstrukce s tlakovým distribučním dílcem	34
2.2.2 Konstrukce bez tlakového distribučního dílce.....	35
2.2.3 Konstrukce se sférickým tlakovým dílcem zabudovaným v axiálním segmentu.....	35
2.3 Hlavní části ložiska se samo-vyrovnávacími elementy	36
2.3.1 Axiální segment	37
2.3.2 Tělo ložiska.....	37
2.3.3 Tryska	38
2.3.4 Krycí plech.....	38
2.3.5 Snímač zatížení	38
2.3.6 Tlakový distribuční dílec	39
2.3.7 Vyrovnávací element (vahadlo).....	40
3 Technologičnost konstrukce	47
3.1 Technologičnost konstrukce jako přístup k návrhu a výrobě axiálního ložiska se samo-vyrovnávacími elementy	47
3.2 Technologičnost konstrukce sestavy axiálního kluzného ložiska se samo- vyrovnávacími elementy	50
3.3 Technologičnost konstrukce vyrovnávacího elementu (vahadla).....	52
3.3.1 Tvar (Geometrie)	52
3.3.2 Materiál.....	54
3.3.2.1 Volba polotovaru	55
3.3.2.2 Volba materiálu	55
3.3.2.3 Volba technologie povrchových úprav a povrchových zpevnění.....	57

3.3.3	Technologie	57
4	Volba technologie povrchových úprav a zpevnění.....	59
5	Statistika.....	61
5.1	Navrhování a vyhodnocování experimentů (DoE)	61
6	Cíle disertační práce	66
6.1	Hlavní cíle.....	66
6.2	Konkrétní (dílčí) cíle.....	66
6.3	Předpokládané přínosy pro praxi:	67
6.4	Předpokládané přínosy pro teorii:.....	67
7	Experiment.....	68
7.1	Návrh experimentů	69
7.2	Návrh a měření geometrie vahadel	70
7.2.1	Rozřazovací jednoduchý test na ověření kinematické funkčnosti ložiska.....	70
7.2.2	Test s měřením silového spektra pod každým segmentem ložiska	72
7.2.2.1	Měření v horizontální poloze.....	74
7.2.2.2	Měření ve vertikální poloze.....	76
7.2.2.3	Diskuze nad výsledky	78
7.3	Experimentální ověření tribologických vlastností vahadel pomocí zjednodušených vzorků 80	
7.3.1	Návrh vzorků pro experiment	80
7.3.2	Výroba testovacích vzorků	84
7.3.3	Měření povrchu testovacích vzorků.....	85
7.3.4	Metalografická analýza zkušebních vzorků.....	87
7.3.5	Rozřazovací test na tribometru	91
7.3.6	Konstrukční návrh a výroba speciálního tribologického standu.....	100
7.3.7	Frekvenční tribologický test vybraných vzorků	102
7.3.7.1	Nastavení okrajových podmínek testování vzorků.....	102
7.3.7.2	Sestava Válec na Válec	103
7.3.7.3	Sestava Válec na Plochu.....	106
7.3.7.4	Diskuze nad výsledky	108
7.3.8	Statický test vybraných vzorků.....	110
7.3.8.1	Nastavení okrajových podmínek testování vzorků.....	111

7.3.8.2	Sestava Válec na Válec	111
7.3.8.3	Sestava Válec na Plochu.....	115
7.3.8.4	Diskuze nad výsledky	121
7.4	Experimentální ověření tribologických vlastností reálných vahadel	124
7.4.1	Diskuze nad výsledky	129
7.5	Ověření funkčnosti prototypů ložisek v experimentálních zařízeních schopných nasimulovat reálný provoz.....	130
7.5.1	Experimentální turbína DOOSAN Škoda Power TG 10	131
7.5.2	Experimentální převodovkový stand Howden ČKD Compressors a GTW BEARINGS	132
7.5.3	Experimentální kompresorové zařízení Darina IV	135
7.5.4	Diskuze nad výsledky	137
8	Závěr	139
	Soupis publikací autora.....	140
	LITERATURA	142
Příloha 1:	Diskuze o technologičnosti konstrukce ostatních dílů ložiska	P1
Příloha 2:	Technologie povrchových úprav a zpevnění	P4
Příloha 3:	Prvotní výběr technologií pro dosažení požadavků na funkční plochy	P17
Příloha 4:	Procesní zhodnocení vybraných technologií povrchového zpevnění	P18
Příloha 5:	Definice vybraných pojmů statistického plánování experimentu.....	P22
Příloha 6:	Rozřazovací jednoduchý test na ověření kinematické funkčnosti ložiska.....	P23
Příloha 7:	Test s měřením silového spektra pod každým segmentem ložiska	P26
Příloha 8:	Drsnoměr MAHR MARSURF M300.....	P35
Příloha 9:	Mikroskop MULTICHECK PC 500.....	P36
Příloha 10:	Lineární frézovací centrum DMU 40 eVo linear.....	P37
Příloha 11:	CNC soustruh EMCO MAXXTURN 25	P38
Příloha 12:	Optický mikroskop IFM G4 ALICONA	P39
Příloha 13:	Zařízení pro úpravu povrchu OTEC DF 3	P40
Příloha 14:	Plán experimentu	P41
Příloha 15:	Vybrané grafy drsností.....	P45
Příloha 16:	Změřené plochy stop vytvořených na tribometru vzájemným třením válečků 52	
Příloha 17:	Scheffeho testy vybraných parametrů.....	P53

Příloha 18:	Nastavení okrajových podmínek testování vzorků.....	P55
Příloha 19:	Výroba vahadel	P59
Příloha 20:	Snímky vyrobeného vahadla z ŘEM	P60
Příloha 21:	Statický destruktivní test vahadel	P62
Příloha 22:	Experimentální převodkový stand Howden ČKD Compressors a GTW BEARINGS 64	

Seznam obrázků

Obr. 1: Srovnání scénářů tuzemské netto spotřeby elektřiny bez zahrnutí spotřeby v rámci elektromobility [1]	27
Obr. 2: Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny [1].....	27
Obr. 3: Průmyslová parní turbína DOOSAN Škoda Power [7].....	28
Obr. 4: Axiální kluzné ložisko s naklápěcími segmenty [10].....	30
Obr. 5: Striebeckova křivka [17]	31
Obr. 6: Fatigue crackings – Cínová kompozice kompletně poškozená únavovými trhlinami – ty jsou způsobené dynamickým namáháním, nebo dlouhodobým „přehříváním“ ložiska. [21] ..	31
Obr. 7: Závislost vychýlení na obvodové rychlosti a měrném zatížení ložiska [19].....	32
Obr. 8: Axiální ložisko s pružícím prstencem [10].....	32
Obr. 9: Znárodnění přenesení síly pomocí vahadel [10].....	33
Obr. 10: Princip naklopení vahadel – nahoře hřidel není vychýlená, dole již ano [26]	33
Obr. 11: Axiální ložisko se samo-vyrovnávacími elementy – popis jednotlivých součástí [10]	34
Obr. 12: Sestava axiálního samovyrovnávacího ložiska [15].....	35
Obr. 13: Sestava axiálního samo-vyrovnávacího ložiska [23]	35
Obr. 14: Sestava axiálního samovyrovnávacího ložiska [13] [14]	36
Obr. 15: SlimLine [22].....	36
Obr. 16: Části axiálního segmentu [28]	37
Obr. 17: Varianty provedení pívotu jednosměrná (vpravo a vlevo) a obousměrná (uprostřed) [autor].....	37
Obr. 18: Tělo ložiska – vlevo: strana kde jsou axiální segmenty, vpravo: strana kde jsou vahadla [autor].....	38
Obr. 19: Tryska [autor]	38
Obr. 20: Krycí plech [autor]	38
Obr. 21: Tenzometrický snímač [30].....	38
Obr. 22: Tlakový distribuční dílec [autor]	39
Obr. 23: Průběh pozic vahadel po linearizaci [mm] [33]	40
Obr. 24: Princip naklopení vahadel [26].....	40
Obr. 25: 3D kinematický model ložiska s 18 segmenty (36 vahadel) s vazbami řízenými cykloidami – odvalování [autor].....	41

Obr. 26: Rozložení sil na vahadle – ideální stav [26] vs. realita [34].....	42
Obr. 27: Opatření vahadel v případě nedodržení výše zmíněných zásad [13], [37].....	42
Obr. 28: Skica sestavy vahadel [15]	43
Obr. 29: Detail na obrobené plochy vahadla [autor]	43
Obr. 30: Profil vahadla (vlevo), sestava vahadel (vpravo) – kontaktní dvojice [autor]	44
Obr. 31: Profil vahadel při vychýlení [autor]	44
Obr. 32: Detail na vahadla fixovaným pomocí drážek v těle ložiska [autor]	44
Obr. 33: Sestava vahadel [28].....	45
Obr. 34: Detail na standardní vahadlo [31].....	45
Obr. 35: Sestavy vahadel s vloženým válečkem od různých výrobců [24] [25]	46
Obr. 36: SlimLine [22].....	46
Obr. 37: Závislosti relativní pracnosti na stupni přesnosti a drsnosti [39]	48
Obr. 38: Závislost výrobních, montážních a celkových nákladů na velikosti rozměrové tolerance [39]	49
Obr. 39: Nálitek k snadnému vyjmutí vahadla z těla [autor].....	50
Obr. 40: Sestava vahadel s axiálními naklápěcími segmenty a tlakovým distribučními dílci – princip rozložení [27].....	51
Obr. 41: Návrh změny profilu vahadla v případě firmy Mitsubishi [42] [43].....	53
Obr. 42: Tvar vahadel při pohledu shora – vlevo konvenční tvar, vlevo symetrický tvar [autor]	53
Obr. 43: FEM analýza – rozložení redukovaného napětí (σ_{HMH}) na vyvažovacím systému [48]	55
Obr. 44: Ukázka rozložení redukovaného napětí σ_{HMH} v kořeni ramene vahadla [48]	56
Obr. 45: Simulace procesu obrábění vahadla na 5-ti osém frézovacím centru v prostředí CAM [41].....	58
Obr. 46: Měření kritické hodnoty – výšky vahadel	58
Obr. 47: Schéma experimentu podle DoE [50].....	61
Obr. 48: Body obsažené v centrálním kompozitním plánu [51].....	63
Obr. 49: Normální rozdělení-Gaussova křivka [57]	65
Obr. 50: Schematické znázornění druhů opotřebení	68
Obr. 51: Základní sestavení se dvěma číselníkovými úchylkoměry + detail na otvor pro kontrolu pozice vahadel [autor].....	71
Obr. 52: Rozdělení na 4 kvadranty [autor]	71

Obr. 53: Zjednodušené schéma měření samo-vyrovnávacího ložiska na standu [33].....	72
Obr. 54: Reálné měřicí zařízení vč. popisek [58]	73
Obr. 55: Rozdělení na 4 kvadranty, vyznačení pozice válců a rozmístění úchylkoměrů	74
Obr. 56: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	75
Obr. 57: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	75
Obr. 58: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	76
Obr. 59: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	77
Obr. 60: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	77
Obr. 61: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze [58]	77
Obr. 62: Rozdíl síly na nejvíc a nejmíň zatíženém segmentu vztažen na vychýlení ložiska o $0,1^\circ$ [MPa/mm] [58]	78
Obr. 63: Porovnání s konkurencí – rozdíl síly na nejvíc a nejmíň zatíženém segmentu vztažen na vychýlení ložiska o $0,1^\circ$ [MPa/mm] [58].....	79
Obr. 64: Porovnání s konkurencí – rozdíl síly na nejvíc a nejmíň zatíženém segmentu vztažen na vychýlení ložiska o $0,1^\circ$ [MPa/mm] [58].....	79
Obr. 65: Závislost maximálního vychýlení na výrobní přesnosti.....	80
Obr. 66: Diagram příčin a následků (Ishikawa diagram) zohledněn pro kvalitu obrobeného povrchu [autor]	81
Obr. 67: Testovaný váleček	81
Obr. 68: Obrobený váleček před ulomením.....	84
Obr. 69: Hraniční opotřebení VBD.....	85
Obr. 70: Drsnost povrchu dle DIN EN ISO 13565 [59]	85
Obr. 71: Graf drsností válečků [autor].....	86
Obr. 72: Abbottovy křivky vybraných válečků [autor]	86
Obr. 73: Vzorek bez povrchové úpravy okraj – zvětšeno 100x (vlevo); detail – zvětšeno 500x (vpravo).....	88
Obr. 74: Vzorek niklovaný, jemně soustružený povrch s vyznačenou tloušťkou vrstvy – zvětšeno 200x (vlevo); střed vzorku – zvětšeno 500x (vpravo)	88

Obr. 75: Vzorek niklovaný, hrubě soustružený s vyznačenou tloušťkou vrstvy – zvětšeno 200x(vlevo); střed vzorku – zvětšeno 500x (vpravo)	88
Obr. 76: Vzorek nitridovaný – externí dodavatel, tloušťka bílé vrstvy zvětšeno 200x (vlevo); střed vzorku zvětšeno 500x (vpravo)	90
Obr. 77: Vzorek nitridovaný – KMM (ZČU), tloušťka bílé vrstvy zvětšeno 200x (vlevo); střed vzorku zvětšeno 500x (vpravo).....	90
Obr. 78: Hloubkový profil tvrdosti nitridovaných vzorků.....	90
Obr. 79: Výroba a ustavení válečků v držáku.....	91
Obr. 80: Testování válečků na tribometru (vlevo); detail opotřebení (vpravo).....	92
Obr. 81: Grafy všech opotřebení válečků na tribometru [autor].....	93
Obr. 82: Grafy opotřebení válečků na tribometru po 20tis. cyklech a 5 N [autor].....	93
Obr. 83: Vzorek 11–20 zvětšení x, 1800 cyklů 5 N (vlevo); Vzorek 55 - 10x zvětšení - 5 tis. cyklů, 5 N zátěž (vpravo).....	94
Obr. 84: Vzorek 13 - 20x zvětšení – 20tis. cyklů 5 N (vlevo); Vzorek 49 - 10x zvětšení - 5 tis. cyklů, 5 N zátěž (vpravo).....	94
Obr. 85: Vzorek 5- 20x zvětšení - 1800 cyklů 5N (vlevo); Vzorek 27- 20x zvětšení - 20 tis. cyklů, 5N zátěž (vpravo).....	95
Obr. 86: Vzorek 51 s Ni povrchovou úpravou – 30x zvětšení.	95
Obr. 87: Grafy závislosti jednotlivých faktorů	97
Obr. 88: Abbottovy křivky vybraných válečků č. 1-54 (neomleté) a č. 55-108 (omleté)	98
Obr. 89: Potřebná přesnost v sadě v závislosti na času výroby sady 12 vahadel při započtení zmetkovitosti.....	99
Obr. 90: Základní rám připravený pro montáž držáků	100
Obr. 91: Detail usazení vzorků proti sobě v držácích s vyznačením možnosti pohybů	101
Obr. 92: Detail na nastavitelné držáky a budič kmitů.....	101
Obr. 93: Detail rozsáhlejší opotřebení o šířce 0,67 mm horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 6	103
Obr. 94: Vedle adhezních vrstev docházelo často také k zahlazení povrchu a stop po předchozím obrábění. Nikde nedošlo k poškození soudržnosti vrstvy nitridů.....	103
Obr. 95: Uspořádání testu – Poloha válečků vůči sobě	103
Obr. 96: Vzorek 11 – měření stopy 10x zvětšení	104
Obr. 97: Frekvenční zatížení (všechny vzorky dohromady).....	105
Obr. 98: Vzorek 10 spodní neupravený, 10 x zvětšení (vlevo); Vzorek 11 horní neupravený, 30x zvětšení (vpravo).....	105

Obr. 99: Vzorek 66 nitridace, 10x zvětšení (vlevo); Vzorek 67 nitridace, 10x zvětšení (vpravo)	105
Obr. 100: Vzorek 14 niklování, 20x zvětšení (vlevo); Vzorek 15 niklování, 20x zvětšení (vpravo).....	106
Obr. 101: Uspořádání testu – Váleček proti destičce.....	106
Obr. 102: Vzorek 70: Destička 8 – nepovlakovaná (měření plochy)	106
Obr. 103: Frekvenční zatížení (všechny vzorky dohromady).....	107
Obr. 104:Destička 2 – Jen TZ, 30x zvětšení (vlevo); Vzorek 16 (váleček) – Jen TZ, 30x zvětšení (střed); Vzorek 70 (váleček) Jen TZ, 30x zvětšení (vpravo)	108
Obr. 105: Destička 14 - nitridace, 30x zvětšení, změření úlomků vrstvy (vlevo); Váleček 17 - nitridace, 63x zvětšení – detail degradace nitridované vrstvy (vpravo)	108
Obr. 106:Váleček 18 niklování, 10x zvětšení (vlevo); Destička 32, 40x zvětšení (střed); Váleček 72, niklování, 20x zvětšení (vpravo)	108
Obr. 107: Porovnání opotřebení sestav Válec/Válec a Válec/Plocha.....	110
Obr. 108: Uspořádání testu – Praktická ukázka.....	110
Obr. 109: Uspořádání testu – Poloha válečků vůči sobě	111
Obr. 110:Vzorek 11 2t 20x zvětšení, měření stopy	111
Obr. 111: Statické zatížení (všechna zatížení dohromady).....	112
Obr. 112: Vzorky TS (Omleté vs. Neomleté).....	113
Obr. 113: Vzorky TZ + Nitridace (Omleté vs. Neomleté).....	113
Obr. 114: Vzorky TZ + Niklování (Omleté vs. Neomleté)	113
Obr. 115: Vzorek 11 – Pouze TZ - 0,5t zatížení, 30x zvětšení (vlevo); 2t zatížení, 20x zvětšení (vpravo).....	114
Obr. 116: Vzorek 66, nitridace 0,5t zatížení, 30x zvětšení (vlevo); 2t zatížení, 30x zvětšení, trhliny v okolí vtisku (vpravo).....	114
Obr. 117: Vzorek 15, niklování 0,5t zatížení, 20x zvětšení (vlevo); 2t zatížení, 20x zvětšení (vpravo).....	114
Obr. 118: Vzorek 67, nitridace, 1 t vtisk, zvětšení 152x – detail trhliny na okraji vtisku (vlevo); střed vtisku, detail delaminované vrstvy (vpravo).....	115
Obr. 119: Vzorek 15, niklování, 0,5 t vtisk, zvětšení 250x, detail vtisku. Patrné značné množství trhlín, delaminace není patrná (vlevo); 1 t vtisk, zvětšení 350x, detail okraje vtisku, nahnutí okraje při plastické deformaci (vpravo).....	115
Obr. 120:Uspořádání testu – Váleček proti destičce.....	115
Obr. 121: Vzorek 18 destička, niklováný, 20x zvětšení, 1t zatížení, měření	116
Obr. 122: Statické zatížení (všechna zatížení dohromady).....	116

Obr. 123: Vzorky TZ (Omleté vs. Neomleté).....	117
Obr. 124: Vzorky TZ + Nitridace (Omleté vs. Neomleté).....	117
Obr. 125: Vzorky TZ + Niklování (Omleté vs. Neomleté)	117
Obr. 126: Vzorek 16 destička, pouze zušlechtěný, 20x zvětšení, - Již viditelné poškození i při 0,5 t zatížení – (vlevo); 5 t zatížení (vpravo).....	118
Obr. 127: Vzorek 17 destička, nitridace, 20x zvětšení, - Nerozpoznatelné žádné poškození při 0,5 t zatížení, (vlevo); začínající poškození při 2 t zatížení (vpravo).....	118
Obr. 128: Vzorek 17 destička, nitridace, 20x zvětšení, 5 t zatížení, poškození	118
Obr. 129: Vzorek 18 destička, niklovaný, 20x zvětšení – Již viditelné poškození při 1t zatížení	118
Obr. 130: Vzorek 71 - nitridovaný (destička) - 5t zatížení, 58x zvětšení (vlevo), 117x zvětšení (uprostřed), 1000x zvětšení (vpravo).....	119
Obr. 131: Vzorek 71 - nitridovaný (váleček) - 5t zatížení, 56x zvětšení (vlevo), 800x zvětšení (uprostřed), 2000x zvětšení (vpravo).....	119
Obr. 132: Vzorek 72 - niklovaný (destička) - 5t zatížení, 46x zvětšení (vlevo), 250x zvětšení (vpravo).....	120
Obr. 133: Vzorek 72 - niklovaný (destička) - 2t zatížení, 50 x zvětšení (vlevo), 250 x zvětšení (vpravo).....	120
Obr. 134: Vzorek 72 - niklovaný (váleček) - 2t zatížení, 60 x zvětšení (vlevo), 158 x zvětšení (vpravo).....	120
Obr. 135: Paprskovitá prasklina v nitridované vrstvě.....	121
Obr. 136: Detail nitridační vrstvy uvnitř vytvořené stopy	121
Obr. 137: Statické zatížení (všechna zatížení a sestavení dohromady)	122
Obr. 138: Vzorky TZ (Omleté vs. Neomleté).....	122
Obr. 139: Vzorky TZ + Nitridování (Omleté vs. Neomleté).....	123
Obr. 140: Vzorky TZ + Niklování (Omleté vs. Neomleté)	123
Obr. 141: 2 možné způsoby upnutí vahadel při omílání (vlevo); Proces omílání vahadel (vpravo)	124
Obr. 142: Porovnání drsnosti Ra (neomleté) vs. Ra (omleté).....	124
Obr. 143: Porovnání drsností Rz (neomleté) vs. Rz (omleté).....	125
Obr. 144: Vahadla pro omílání. Vpravo detail na vahadlo 2.1.....	125
Obr. 145: Vahadlo po niklování	125
Obr. 146:Zatížení segmentů při stranovém zatížení válcem C ~70kN a středovém zatížení ~100kN – realita vs. teorie.....	126

Obr. 147: Ustavení vahadla v lisu.....	127
Obr. 148: Vahadlo 22 – oblast B. Jak zachytily následné snímky z řádkovacího elektronového mikroskopu, i tento zcela prokazatelný defekt z hlediska vizuálního pozorování nelze klasifikovat jako poškození povrchu, ale pouze jako nečistoty na povrchu, které nebylo možné odstranit ani důkladným očištěním	127
Obr. 149: Vahadlo 22 – oblast B – snímek potvrzující, že domnělé trhliny jsou pouze povrchové tenké filmy nečistot a nejedná se o defekty, pouze o nečistoty.	128
Obr. 150: Vahadlo 31 – oblast A. Tomuto vahadlu byla věnována větší pozornost. Na niklovaném povrchu byly zjištěny defekty, které nesouvisí se statickým zatížením, ale jejich původ je v nehomogenitě povrchu – viz snímky z řádkovacího elektronového mikroskopu.	128
Obr. 151: Vahadlo 31 – oblast B, v této oblasti byly při vizuální zkoušce zjištěny defekty, které souvisí s technologií předchozí povrchové úpravy, nikoliv se statickým zatížením.	128
Obr. 152: Vahadlo 31 – oblast A – povrchové defekty, které jsou spojeny s vytvářením vrstvy, nikoliv se statickým zatížením povrchu. (vlevo); Vahadlo 31 – oblast B – povrchové defekty stejného charakteru jako v oblasti A byly zachyceny také na rovném povrchu vahadla (vpravo)	129
Obr. 153: Vahadlo 31 – oblast B – povrchové defekty – detailní snímek dokumentuje jak povrchové nerovnosti, tak i trhliny způsobené přítomností těchto defektů.	129
Obr. 154: Experimentální turbína DOOSAN Škoda Power TG 1: Celek (vlevo); Detail na kombinované ložisko (vpravo)	131
Obr. 155: Kombinované kluzné ložisko pro TG10 – řez.....	131
Obr. 156: Teploty a zatížení segmentů axiálního ložiska (aktivní strana).....	132
Obr. 157: Experimentální převodkový stand.....	132
Obr. 158: Experimentální převodkový stand.....	133
Obr. 159: Maximální teploty na všech axiálních ložiscích v závislosti na měrném zatížení ložiska	134
Obr. 160: Teploty na samo-vyrovnávacím ložisku v závislosti na měrném zatížení ložiska.	134
Obr. 161: Experimentální kompresorové zařízení Darina IV	135
Obr. 162: Teplotní pole ložiska při 0° vychýlení (vlevo) a při 0,2° vychýlení (vpravo).....	136
Obr. 163: Teplotní pole ložiska při 0,2° vychýlení)	137
Obr. P- 1: Rozdíly v úpravě zadní části segmentu – vlevo pro samo-vyrovnávací provedení, vpravo standardní provedení [autor].....	P1
Obr. P- 2: Tlakový distribuční dílec – rozdíly ploch, které se stýkají s axiálním segmentem – vlevo ploška o malém průměru, vpravo plocha kulového tvaru [autor].....	P2
Obr. P- 3: Srovnání tloušťky a hloubky obvyklých povrchových úprav [66]	P5

Obr. P- 4: Vliv obsahu prvků na tvrdost nitridované vrstvy (vlevo); Vliv obsahu leg. prvků na tloušťku nitridované vrstvy [67]	P6
Obr. P- 5: Tepelné zpracování NiP povlaků [69]	P9
Obr. P- 6: Tvrdost NiP povlaků v závislosti na obsahu P v tepelně nezpracovaném stavu [68]	P9
Obr. P- 7: Válečkování [70].....	P10
Obr. P- 8: Odstředivé omílání [75]	P12
Obr. P- 9: Princip vlečného omílání [76].....	P12
Obr. P- 10: Princip vibračního omílání [77]	P12
Obr. P- 11: Kukuřičný granulát [89].....	P13
Obr. P- 12: Laserový systém ACP02 od firmy MEPAC CZ [83]	P15
Obr. P- 13: Schéma vzniklých oblastí materiálu při procesu laserového navařování [84]....	P15
Obr. P- 14: Soustružení žárového nástřiku (vlevo Stellite 6, vpravo Cr3C2-25% NiCr [86]	P16
Obr. P- 15: Procesní zhodnocení – bodovací metoda [41]	P20
Obr. P- 16: Procesní zhodnocení – metoda váženého součtu	P21
Obr. P- 17: 1. konstrukční návrh geometrie vahadel	P23
Obr. P- 18: „Rádus na rádus“+ „plocha na plochu“	P23
Obr. P- 19: 3. konstrukční návrh – varianty vahadel [58]	P24
Obr. P- 20: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	P26
Obr. P- 21: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	P27
Obr. P- 22: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	P27
Obr. P- 23: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	P28
Obr. P- 24: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	P28
Obr. P- 25: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze [58].....	P28
Obr. P- 26: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	P29
Obr. P- 27: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	P29

Obr. P- 28: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]	P30
Obr. P- 29: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	P30
Obr. P- 30: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	P31
Obr. P- 31: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	P31
Obr. P- 32: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	P32
Obr. P- 33: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	P32
Obr. P- 34: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	P32
Obr. P- 35: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska	P33
Obr. P- 36: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]	P33
Obr. P- 37: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze [58].....	P34
Obr. P- 38: Drsnoměr Marsurf M300	P35
Obr. P- 39: Dílenský mikroskop MULTICHECK P500.....	P36
Obr. P- 40: DMU 40 eVo linear	P37
Obr. P- 41: EMCO MAXXTURN 25	P38
Obr. P- 42: IFM G4 ALICONA.....	P39
Obr. P- 43: OTEC DF 3	P40
Obr. P- 44: Abbottovy křivky válečků č. 1-54 neomletých + 55-108 omletých	P45
Obr. P- 45: Porovnání naměřených drsností pomocí drsnoměru MAHR a optického mikroskopu IFM G4 ALICONA	P46
Obr. P- 46: Porovnání naměřených drsností pomocí drsnoměru MAHR a optického mikroskopu IFM G4 ALICONA	P46
Obr. P- 47: Porovnání drsností Rk před a po omletí.....	P47
Obr. P- 48: Porovnání drsností Rvk před a po omletí.....	P47
Obr. P- 49: Porovnání Ra (neomleté) vs. Ra (omleté) vs. Rz (neomleté) vs. Rz (omleté)....	P48
Obr. P- 50: Optické 3D měření povrchu pomocí přístroje Alicona.....	P49

Obr. P- 51: Porovnání drsností změřených díl. drsnoměrem a Aliconou [autor]	P49
Obr. P- 52: Abbottovy křivky vybraných válečků č. 1-54 (Dílenský Drsnoměr vs. ALICONA)	P50
Obr. P- 53: Abbottovy křivky vybraných válečků č. 55-108 - omlété (Dílenský Drsnoměr vs. ALICONA)	P50
Obr. P- 54: Scan válečku č. 55 před omíláním [autor]	P51
Obr. P- 55: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 1	P55
Obr. P- 56: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 2	P56
Obr. P- 57: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 3	P56
Obr. P- 58: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 4	P57
Obr. P- 59: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 5	P57
Obr. P- 60: Detail rozsáhlejší opotřebení o šířce 0,67 mm horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 6	P57
Obr. P- 61: Vedle adhezních vrstev docházelo často také k zahlazení povrchu a stop po předchozím obrábění. Nikde nedošlo k poškození soudržnosti vrstvy nitridů	P58
Obr. P- 62: Fotky z obrábění vahadel	P59
Obr. P- 63: Vahadlo ložiska – na snímku jsou vyznačeny oblasti povrchu, který byl zdokumentován pomocí řádkovacího	P60
Obr. P- 64: Povrchový stav v místě 1 – zde při sesazení dojde ke kontaktu s protikusem (vlevo); detail oblasti snímku (vpravo)	P60
Obr. P- 65: Povrchový stav v místě 2 (vlevo); Povrchový stav v místě 2 – detail (vpravo) .	P60
Obr. P- 66: Kontaktní plocha vahadla. V blízkosti otvoru je zachycena otláčená oblast, rovněž v druhé oblasti je vidět poškození povrchu, které vzniklo v důsledku kontaktu s nějakým protikusem, a to i přestože je vahadlo nové. (vlevo). Detail obrobené plochy – je zachycen překryv jednotlivých stop po obrábění (vpravo).....	P61
Obr. P- 67: Detail poškozeného povrchu – jedná se o nový výrobek, proto toto poškození vzniklo v důsledku manipulace se vzorkem, popř. jako nechtěný kontakt povrchu s frézou (vlevo). Větší detail poškozeného povrchu (vpravo).....	P61
Obr. P- 68: Sestava vahadel	P62
Obr. P- 69: Průběh ohybu – všechny vahadla.....	P63
Obr. P- 70: Zdeformovaná vahadla – nejmenší velikost	P63

Obr. P- 71: FEM výpočet torzního předepínání soustavy s uvažování kontaktu ozubení a vůlí ložisek	P64
Obr. P- 72: Rozmístění termočlánků v ložisku	P64
Obr. P- 73: Rozložení teplot u samo-vyrovnávacího ložiska bez zatížení v závislosti na otáčkách	P65
Obr. P- 74: Rozložení teplot u ložiska s pevným profilem bez zatížení v závislosti na otáčkách	P65
Obr. P- 75: Maximální teploty na všech axiálních ložiscích v závislosti na měrném zatížení ložiska	P66
Obr. P- 76: Teploty na samo-vyrovnávacím ložisku v závislosti na měrném zatížení ložiska	P66
Obr. P- 77: Teploty na konvenčním segmentovém ložisku v závislosti na měrném zatížení ložiska	P67

Seznam tabulek

Tab. 1:Uvažované tvary vahadel pro budoucí výzkum	53
Tab. 2: Zatížení postranních válců 70kN [58]	75
Tab. 3: Zatížení postranních válců 70kN [58]	76
Tab. 4:Pořadí testů pin-on-disk pro každý blok.....	84
Tab. 5: Chemické složení vzorků:	87
Tab. 6: Mikrotvrdotost jemně soustružených vzorků deponovaných Ni povlakem HV 0,025 ...	89
Tab. 7: Mikrotvrdotost hrubě soustružených vzorků deponovaných Ni povlakem HV 0,025	89
Tab. 8: Tabulka mikrotvrdotosti středů vzorků neupravovaného a nitridovaných.....	91
Tab. 9: ANOVA pro jednotlivé faktory	96
Tab. 10: ANOVA č.2 pro jednotlivé faktory	96
Tab. 11: Potřebná přesnost v sadě v závislosti na času výroby	99
Tab. 12: Změřené šířky stop po frekvenční zkoušce pro sestavení Válec / Válec	104
Tab. 13: Změřené šířky stop po frekvenční zkoušce pro sestavení Válec / Plocha.....	107
Tab. 14 : Změřené šířky stop po statické zkoušce pro sestavení Válec / Válec	112
Tab. 15: Změřené šířky stop v μm po statické zkoušce pro sestavení Válec / Plocha	116
Tab. 16: Rozložení sil u 18-ti seg. ložiska při stranovém zatížení válcem C $\sim 70\text{kN}$ a současném středovém zatížení $\sim 100\text{kN}$	126
Tab. P- 1 Seznam ocelí nejčastěji používaných pro nitridaci [66]	P6
Tab. P- 2: Vhodná fázová struktura pro definované typy namáhání [66].....	P7
Tab. P- 3: Rozhodovací tabulka technologií.....	P17
Tab. P- 4: Stanovení vah preference kritérií A [41]	Tab. P- 5: Stanovení vah preference kritérií B [41]
preference kritérií B [41]	P19
Tab. P- 6: Bodovací stupnice kritérií [41]	P20
Tab. P- 7: Bodovací metoda [41].....	P20
Tab. P- 8: Metoda váženého součtu [41]	P21
Tab. P- 9: Tabulka s hodnotami měření 1. konstrukčního návrhu geometrie vahadel	P23
Tab. P- 10: Tabulka s hodnotami měření 2. konstrukčního návrhu geometrie vahadel	P24
Tab. P- 11: Tabulka s hodnotami měření 3. konstrukčního návrhu geometrie vahadel sestavení „rádius na rádius“+ „rádius na rádius“	P25

Tab. P- 12: Tabulka s hodnotami měření 3. konstrukčního návrhu geometrie vahadel sestavení „rádius na rádius“ + „rádius na plochu“	P25
Tab. P- 13: Tabulka s hodnotami měření 3. konstrukčního návrhu geometrie vahadel sestavení „rádius na plochu“+ „rádius na plochu“	P25
Tab. P- 14: Zatížení postranních válců 20kN [58].....	P26
Tab. P- 15: Zatížení postranních válců 40kN [58].....	P27
Tab. P- 16: Zatížení postranních válců 70kN [58].....	P29
Tab. P- 17: Zatížení postranních válců 20kN [58].....	P30
Tab. P- 18: Zatížení postranních válců 40kN [58].....	P31
Tab. P- 19: Zatížení postranních válců 70kN [82].....	P33
Tab. P- 20: Změřené plochy stop vytvořených na tribometru vzájemným třením válečků...	P52
Tab. P- 21: Scheffeho test – Posuv	P53
Tab. P- 22: Scheffeho test – Počet cyklů	P53
Tab. P- 23: Scheffeho test – Stav povrchu vs. Posuv	P54

Seznam zkratek, symbolů a značek veličin

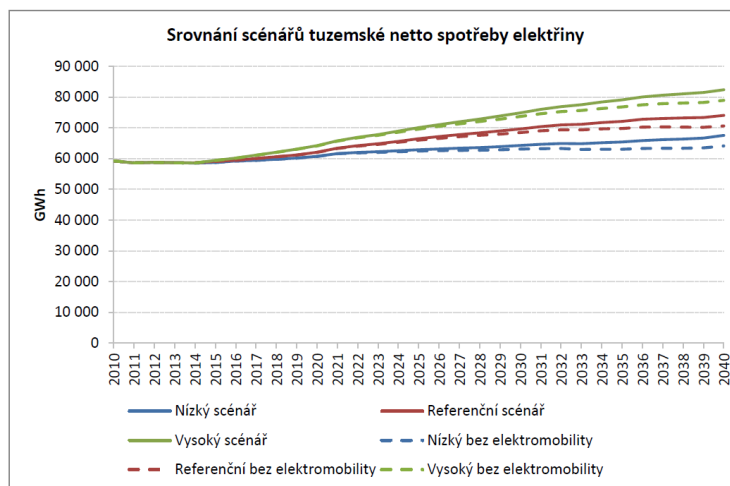
Zkratka	Popis
3D	Trojrozměrný
A1	Teoretická plocha hrotů v abbottově křivce
A2	Teoretická plocha rýh v abbottově křivce
Al	Hliník
ANOVA	Z anglického "ANalysis Of Variance" - Analýza rozptylu
API	Z anglického "American Petroleum Institute" - americký petrolejářský institut
As	Arsen
B	Bor
C	Uhlík
CAD	Z anglického „Computer Aided Design“ = počítačem podporované projektování
CAM	Z anglického „Computer Aided Machining“ = počítačem podporované obrábění
CCW	„Counterclockwise“ – Proti směru hodinových ručiček
Cd	Kadmiun
CNC	Počítačem řízený (obráběcí) stroj
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Cu	Měď
CW	„Clockwise“ – Po směru hodinových ručiček
ČR	Česká republika
ČSN	Chráněné označení českých technických norem
DoE	Design of Experiments => plánování experimentů
EN	Evropská norma
EU	Evropská Unie
HB	Označení statické zkoušky tvrdosti materiálu dle Brinella
HDP	Hrubý domácí produkt
HPC	Z anglického „High Performance Cutting“ = vysokovýkonné obrábění
HRC	Označení statické zkoušky tvrdosti materiálu dle Rockwella
HSC/HSM	Z anglického „High Speed Cutting/Machining“ = vysokorychlostní řezání/obrábění
HV	Označení statické zkoušky tvrdosti materiálu dle Vickerse
HVOF	(High velocity oxy-fuel coating spraying – vysokorychlostní nástřik plamenem)
ISF	Izotropické superfinišování – chemicky urychlené omílání
ISO	Z anglického „International Organization for Standardization“ – mezinárodní organizace zabývající se tvorbou norem
IT	Z anglického „International Tolerance“ - toleranční stupeň přesnosti

KD	Kinematická dvojice
Zkratka	Popis
mm	Milimetr (jednotka délky)
Mo	Molybden
MPa	Megapascal – jednotka tlaku
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
Mr1	Podíl materiálu nad profilem jádra – je určován linií řezu, která vymezuje profil jádra drsnosti ke straně bez materiálu
Mr2	Podíl materiálu pod profilem drsnosti – je určován linií řezu, která vymezuje profil jádra drsnosti ke straně materiálu
N	Dusík
NACE	Klasifikace ekonomických činností dle MPO
P	Fosfor
Pb	Olovo
PC	Z anglického " <i>Personal Computer</i> " - Osobní počítač
pH	Potenciál vodíku
PTFE	Polytetrafluorethylen – teflon
R&D	Z anglického Research and Development – Výzkum a vývoj
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu
Rk	Základní hloubka – hloubka profilu jádra drsnosti (zóna s největším nárůstem podílu materiálu nad určitou hloubku)
Rpk	Redukovaná výška špiček – střední výška špiček profilu, vyčnívající z profilu drsnosti
RPM	Z anglického " <i>Revolutions per minute</i> " - otáčky za minutu
Rvk	Redukovaná hloubka rýh – střední hloubka rýh profilu, zasahujících z profilu jádra drsnosti do materiálu
Rz	Výška nerovností profilu určená z deseti bodů
Sb	Antimon
Si	Křemík
Sn	Cín
SW	Software
Ti	Titan
TPV	Technická příprava výroby
TZ	Tepelně zpracovaný
V	Vanad
VBD	Vyměnitelná břitová destička
W	Wolfram
Zn	Zinek

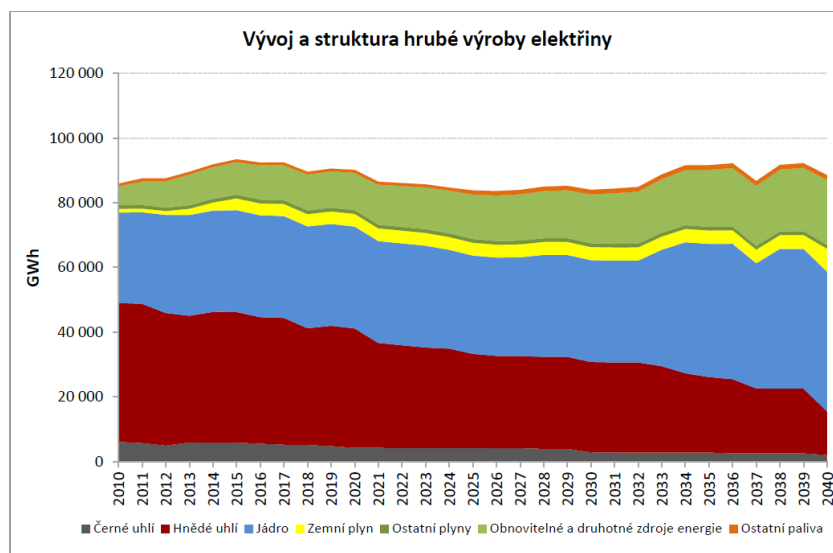
Symboly a značky	Jednotky	Popis
A	%	Tažnost materiálu
a_e	mm	Radiální šířka řezu
a_p	mm	Axiální hloubka řezu
E	GPa	Youngův modul
F	N	Zatížení ložiska
f_z	mm/zub	Posuv na zub
p_{Hmax}	MPa	Maximální Hertzův tlak
v_c	m/min	Řezná rychlost
Z	%	Zúžení materiálu (kontrakce)
Z	MPa/mm	Rozdíl síly na nejvíce a nejméně zatíženém segmentu vztaženo na vychýlení ložiska o $0,1^\circ$
σ_e	MPa	Mez kluzu
σ_O	MPa	Ohybové napětí
σ_{red}	MPa	Redukovaného napětí
τ_{MAX}	MPa	Maximální smykové napětí

Předmluva

Český průmysl stále skrývá ohromný potenciál. Pokud se zaměříme konkrétně na energetický průmysl, má Česká republika velice dobrou pozici. Oproti většině zemí v EU lze v ČR postavit elektrárnu pracující na principu přeměny tepelné energie na kinetickou téměř ze svých vlastních zdrojů. Takto získaný zdroj elektrické energie bude i v budoucnu, jak je vidět z níže uvedených grafů, majoritní. A to i přesto, že energie získaná z obnovitelných zdrojů poroste.



Obr. 1: Srovnání scénářů tuzemské netto spotřeby elektřiny bez zahrnutí spotřeby v rámci elektromobility [1]



Obr. 2: Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny [1]

Z tohoto důvodu je kladen důraz na optimalizaci energetických zařízení, které pracují právě na přeměně tepelné energie na kinetickou (zařízení obsahující turbíny). Tato práce je součástí širšího záměru optimalizace energetických zařízení v České republice, kdy se vláda České republiky pomocí různých dotačních programů snaží o zvýšení účinnosti elektrických zařízení a tím zvýšení konkurenceschopnosti českých podniků.

1 Úvod

Zdroje: [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9]

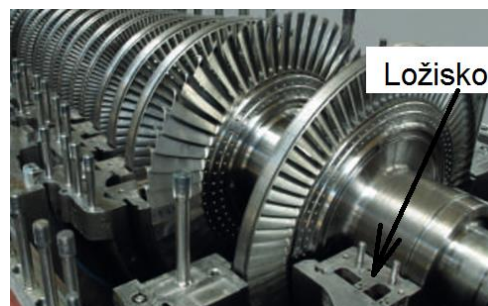
Energetický průmysl (nejen v České republice) se v dnešní době musí vypořádat se dvěma navzájem propojenými trendy. První trend je celosvětově neustále zvyšující se poptávka po elektrické energii a druhý trend je kontinuálně stoupající cena silové elektřiny.

Takto nastalou situaci lze řešit dvěma způsoby:

- stavět nové zařízení (popř. celé elektrárny) s větší účinností,
- vylepšení (zvýšení účinnosti) stávajících zařízení (známé také jako „Retrofit“). [6]

Tak či onak celosvětová roční potřeba točivých strojů (např. turbín, kompresorů, generátorů, turbo-převodovek aj.), která je už teď řádově v tisících kusech, poroste. Česká republika patří mezi významné producenty těchto strojních zařízení a toto odvětví (převážně NACE 27 a 28) se významně podílí na tvorbě HDP, zaměstnanosti a exportu. [5]

Evropská unie si je tohoto problému také vědoma, a proto jsou vytvářeny různé dotace skrze ministerstvo obchodu a průmyslu se zaměřením na optimalizaci energetických zařízení (Potenciál, Alfa, Centrum kompetence, Epsilon apod.).



Obr. 3: Průmyslová parní turbína DOOSAN Škoda Power [7]

Aby mohli výrobci točivých strojů pružně reagovat na rostoucí poptávku po výkonných strojích s vysokou účinností pro specifické použití ve specifických provozních podmínkách a udržet si svůj podíl na trhu, musí mít k dispozici součásti ve špičkové kvalitě.

Jedny z klíčových součástí na výkonném točivém stroji jsou **kluzná ložiska**. Kluzná ložiska se významně podílí na celkovém ztrátovém výkonu stroje, a proto výrobci takovýchto točivých strojů na ložiska (popř. na jejich výrobce) kladou ty nejvyšší nároky.

Kluzná ložiska pro energetická zařízení mohou být rozdělena na mnoho typů, např.:

- Dle směru zatížení:
 - radiální,
 - axiální,
 - kombinovaná.
- Dle geometrie:
 - pevná geometrie,
 - s naklápěcími segmenty.
- Dle schopnosti vyrovnat vychýlení hřídele:
 - konvenční,
 - samovyrovňovací.
- Dle schopnosti izolovat elektrický proud mezi hřídelem a rámem stroje:
 - izolované,
 - neizolované apod. [8]

U velkých rotačních strojů se v důsledku výchylek statorových (ale i rotorových) dílců stává, že není zaručena potřebná rovnoběžnost činné plochy ložiska s činnou plochou límce rotoru. V současné době jediné řešení, které je schopné zachytit vychýlení od rovnoběžnosti osy ložiska s osou hřídele je pomocí systému vahadel – pomocí tzv. samo-vyrovnávacích ložisek. Takovéto řešení je složité a vyžaduje znalost mnoha inženýrských disciplín (technologie, metrologie, konstrukce, mechanika, hydromechanika, metalurgie, tribologie a pouze synergií všech těchto disciplín lze získat optimální výrobek.

V této práci je řešena celková problematika technologičnosti konstrukce samo-vyrovnávacího ložiska s axiálními naklápěcími segmenty s ohledem na optimální funkčnost ložiska, efektivitu výroby ložiska, včetně ověření jeho funkčnosti (viz. cíle disertační práce – kapitola 6).

Z důvodu různých fúzí mezi světovými výrobci ložisek v posledních letech existují v současnosti pouze tři významní světoví dodavatelé, kteří tyto ložiska vyrábí standardně - tj. ne jako speciální projekt. V České republice dosud není žádný výrobce a dodavatel *samo-vyrovnávacích ložisek s axiálními naklápěcími segmenty*. [9]

Každý z těchto výrobců používá s větším či menším úspěchem jinou konstrukci a technologii výroby. Tyto konstrukce jsou popsány v rešerši (kapitola 2), vč. nastínění silných a slabých stránek z pohledu technologičnosti konstrukce.

Nové vlastní řešení *samo-vyrovnávacího ložiska s axiálními naklápěcími segmenty* bylo vyvíjeno ve spolupráci s firmou GTW BEARINGS s.r.o. Firma již dvacet let navrhuje a vyrábí konvenční ložiska s axiálními segmenty. Úspěšnou realizací výroby samo-vyrovnávacího axiálního ložiska se firma zařadí mezi světové výrobce high-tech ložisek pro přenos vysokých výkonů a rychlostí.

2 Rozbor současného stavu řešené problematiky

V této kapitole je provedena rešerše, ve které je popsáno hydrodynamické axiální kluzné ložisko s naklápěcími segmenty a samo-vyrovnávacími elementy. Zároveň je zde popsána problematika fungování samo-vyrovnávacího ložiska vč. porovnání různých přístupů světových výrobců k dané problematice.

2.1 Axiální kluzné ložisko s naklápěcími segmenty – obecně

Zdroje: [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21]

Hydrodynamická axiální kluzná ložiska slouží k zachycení axiálních sil v aplikacích, kde je použití valivých ložisek nevhodné z hlediska rozměrových limitů, životnosti, vysokého zatížení, nebo obtížného přístupu při montáži. U velkých rotačních strojů jako je turbína, turbokompresor, nebo generátor jsou téměř vždy použity axiální kluzná ložiska s naklápěcími segmenty. [10]

Pro kluzné uložení je zapotřebí minimálně dvou těles – samotné ložisko a límec rotoru. Součástí kluzného ložiska jsou pak segmenty, na které je přiváděn mazací olej. Každý segment je samostatnou nosnou částí ložiska. Nosné plochy (ložiska a límce hřídele) jsou kompletně odděleny olejovým filmem o tloušťce obvykle cca. 20 - 40 μ m. Olejový film zamezuje riziku kontaktu (a tím pádem i otěru) nosných ploch. [11]

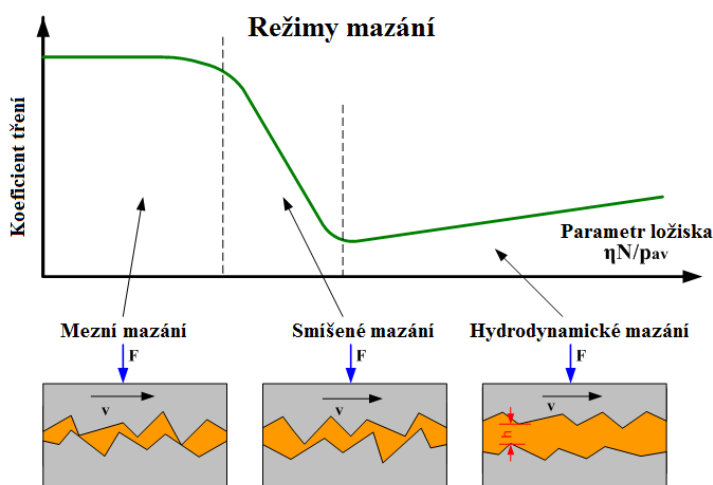


Obr. 4: Axiální kluzné ložisko s naklápěcími segmenty [10]

Princip hydrodynamického mazání ložiska spočívá v tom, že působením hydrodynamických sil v olejovém filmu dochází k naklopení segmentů a tím i vytváření olejového filmu, který má tvar klínu ve směru otáčení ložiska. Tlak v tomto klínu je vyvolán působením adheze protékajícího oleje k rotujícímu límci. Tlakovým polem se zatížení opěrného kotouče působící na rotor, přenáší a rozděljuje na jednotlivé segmenty ložiska. Tlak v olejovém klínu, a tím pádem i zatížení jednotlivých segmentů je nepřímě úměrné tloušťce tohoto olejového klínu. Z hlediska rovnoměrně rozloženého zatížení jednotlivých segmentů a tím i maximální únosnosti celého ložiska, je potřeba zachovávat stejnou tloušťku olejového klínu u všech segmentů. [11] To znamená, že výška segmentů by měla být naprosto stejná (tolerance v řádu mikronů). Proto se také celá sada axiálních segmentů musí brousit na rovinné brusce na finální výšku najednou.

Aby ložisko optimálně plnilo svoji funkci, musí být předně správně vypočteno - tzn. musí mít správné geometrické rozměry. Další podmínkou optimálně pracujícího kluzného uložení je vhodná volba materiálů. Největším problémem často bývá i nesprávné obrobení

geometrického/mikrogeometrického tvaru funkčních ploch. Při nesprávně zvolené obráběcí technologii/strategii mohou být plochy například zvlněné, a tím pádem nesplňují teoretické předpoklady ideální klínové plochy, respektive ideálně navrženého tvaru. K deformaci funkčních ploch může dojít i tepelným zatížením součástí. Důležitou roli hraje drsnost funkčních povrchů kluzného uložení. Nevhodná drsnost může způsobit při nedostatečném mazání (smíšené/mezní - viz. obr. 5) rychlé opotřebení, poškození nebo zničení funkčních ploch. [17] Při velkých kluzných rychlostech může drsnost povrchu změnit charakter proudění média z lami-



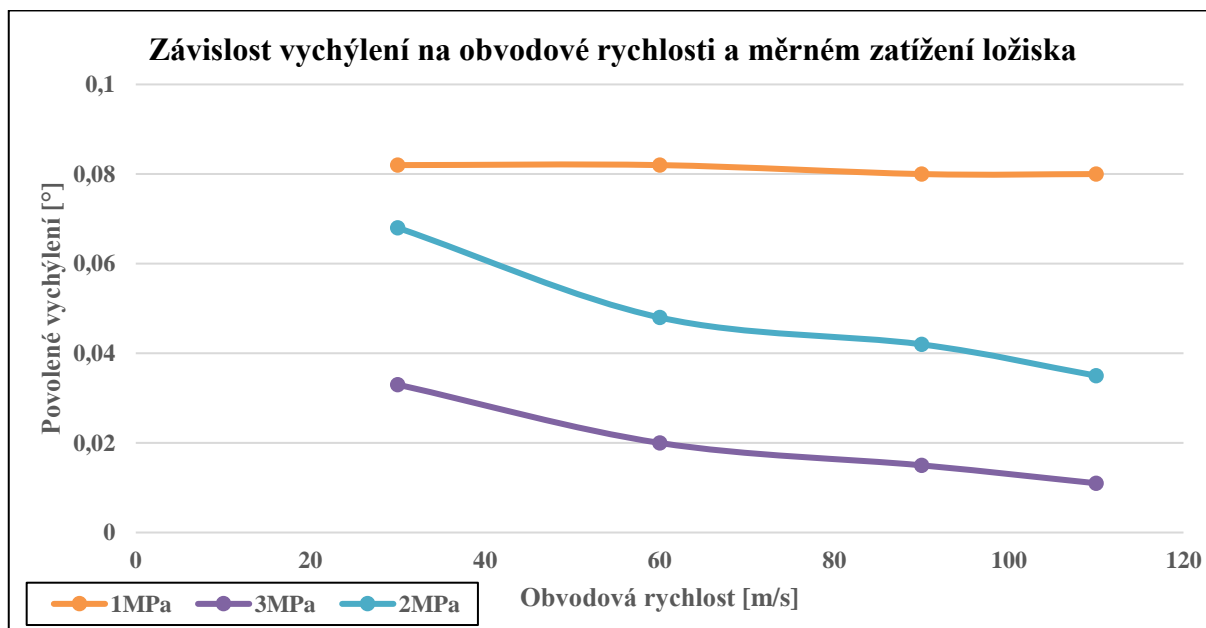
Obr. 5: Striebeckova křivka [17]

dek snížení únosnosti ložiska, které se projevuje tím, že rozdíl naměřených teplot mezi horním a spodním segmentem může být až 60 °C (↑125 °C na spodním segmentu, ↓ 65 °C na horním segmentu). Teplota 125 °C je pak již pro ložiskový kov limitní a zapříčiňuje degradaci ložiskového kovu. Tzv. fatigue cracking – únavové trhliny (obr. 6) jsou způsobené dynamickým namáháním, nebo dlouhodobým „přehříváním“ ložiska. [10]

Velikost dovoleného vychýlení od rovnoběžnosti osy ložiska s osou hřídele je závislá na obvodové rychlosti a velikosti zatížení (viz obr. č. 7), a pokud je vychýlení větší než dovolené, je třeba podniknout kroky k úpravě celkového řešení nebo použít speciální ložisko, které je schopné pojmout toto vychýlení. [19]

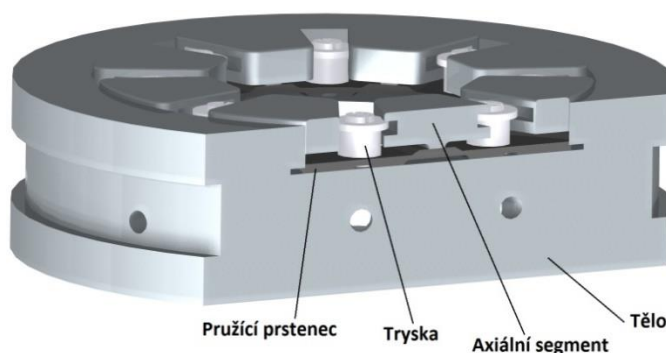


Obr. 6: Fatigue crackings – Cínová kompozice kompletně poškozená únavovými trhlínami – ty jsou způsobené dynamickým namáháním, nebo dlouhodobým „přehříváním“ ložiska. [21]



Obr. 7: Závislost vychýlení na obvodové rychlosti a měrném zatížení ložiska [19]

Fenomén vychýlení límce hřídele z osy ložiska během provozu (až o několik desetin stupně) je znám již několik desetiletí a existuje i několik řešení, jak tento problém částečně eliminovat. Jedním z řešení, které bylo vyvinuto ve Škodě Plzeň, je použití pružné podložky (obr. č. 8), která podstatně zvýší únosnost ložiska. Může mít ale i nepříznivý vliv na jeho životnost. Nedo-
 chází zde k plnohodnotnému vyrovná-
 vání, pouze k deformaci pružiny. Je zde
 riziko poměrně velké axiální vůle (až
 +0,5 mm oproti již napočtené axiální
 vůli). Pružina se také musí pro každý
 případ dimenzovat pomocí složitých
 výpočtů, a to značně prodlužuje dobu
 v TPV. Dále je zde poměrně veliké ri-
 ziko lidského pochybení – při dimenzo-
 vání i výrobě. Výroba probíhá pomocí
 speciálních přípravků, zejména pak při
 tepelném zpracování pružinové oceli.
 Dalším řešením je poddajné ložisko, kde
 se ložiskové segmenty opírají přes kulové čočky o prstence z opěrných segmentů, které jsou ve
 směru zatížení ložiska poddajné. Konstrukce tohoto ložiska je však podstatně složitější. Vzhle-
 dem k nízké tuhosti nepokrývá dostatečnou pracovní oblast a uchycení segmentů k nosnému
 talíři s poměrně značnou vůlí, umožňuje zvláště u nezatížené strany oboustranného ložiska tak-
 zvané „oklepávání“ opěrné plošky ložiskových segmentů. Toto se nepříznivě projevuje na ži-
 votnosti ložiskových segmentů. [18]



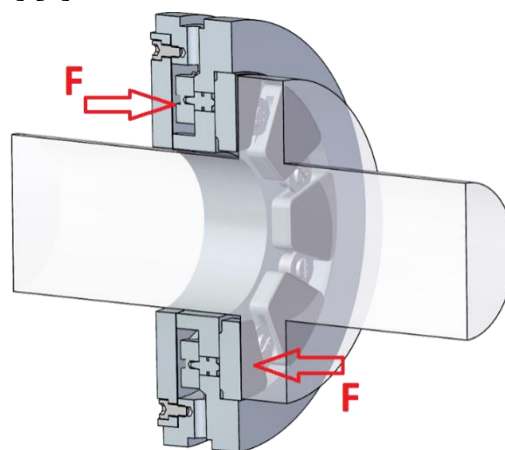
Obr. 8: Axiální ložisko s pružícím prstencem [10]

2.2 Axiální kluzné ložisko s naklápěcími segmenty a se samo-vyrovnávacími elementy

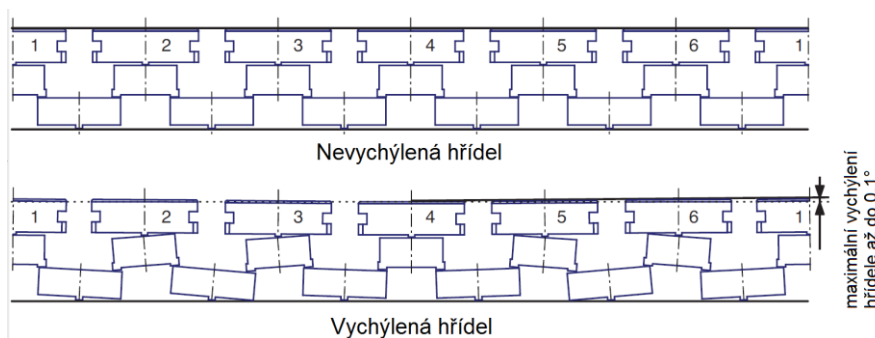
Zdroje: [10] [13] [14] [15] [19] [22] [23] [24] [25] [26] [9]

V současné době jediné řešení, které je schopné zachytit vychýlení od rovnoběžnosti osy ložiska s osou hřídele je pomocí systému vahadel – tzv. samo-vyrovnávací ložisko. Systém vahadel musí být navrhnout a vyroben tak, aby byl schopen přenést tlak/sílu působící na spodní části ložiska do horní části ložiska => aby axiální segmenty ložiska byly vždy v kontaktu s límcem hřídele. (viz obr. č. 9). [10]

Samo-vyrovnávací ložisko je nutno použít, pokud maximální vychýlení hřídele je vyšší, než je znázorněno, v již výše zmíněném grafu (obr. č. 7), kde je vidět závislost přípustného vychýlení límce hřídele na obvodové rychlosti a axiálním zatížení. [10]



Obr. 9: Znázornění přenesení síly pomocí vahadel [10]



Obr. 10: Princip naklopení vahadel – nahoře hřídel není vychýlená, dole již ano [26]

Marketingový průzkum prováděný firmou GTW BEARINGS s.r.o. v České republice a v Německu ukázal, že axiální ložiska se samo-vyrovnávacími elementy používá ve svých strojích mnoho firem (Siemens, Alstom/GE, Howden ČKD Compressors, DOOSAN Škoda Power aj.). U všech těchto výrobců procento využití axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy oproti celkovému počtu nakupovaných axiálních ložisek neustále stoupá. Například v současnosti Howden ČKD Compressors nakupuje do svých strojů 70 % axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy [9]. Zbytek jsou konvenční axiální kluzná ložiska. To znamená, že ve výrobě axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy je veliký potenciál, kterého zatím využívají pouze zahraniční výrobci kluzných ložisek schopných tyto ložiska navrhnout a vyrobí.

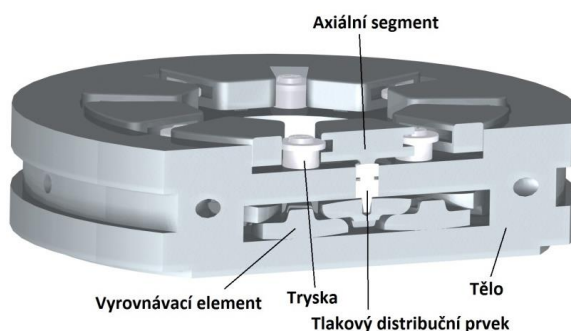
Stroje, ve kterých se nejčastěji vyskytují ložiska se samo-vyrovnávacími elementy, vč. potenciálních zákazníků:

- Kompresory (Siemens, Howden ČKD Compressors...).
- Turbíny (Siemens, Alstom/GE, DOOSAN Škoda Power...).

Ložiska používaná v kompresorech jsou většinou 6-10-ti segmentová. Je to z důvodu velkého rozdílu mezi malým a velkým průměrem mezikruží aktivní plochy límce. Naopak u turbín se mohou vyskytovat 6 až 18-ti (i více) segmentová axiální ložiska. [9]

Axiální kluzné ložisko se samo-vyrovnávacími elementy se skládá z těchto částí (obr. 11):

- axiální segment (bimetalový, ale i trimetalový),
 - tělo segmentu,
 - kompozicová výstelka (na bázi cínu, olova, nebo mědi),
 - sférický tlakový díl (nemusí být vždy),
- tělo ložiska,
- tryska,
- spodní (krycí) plech,
- tenzometrický snímač neboli „load cell“ pro snímání zatížení (volitelně),
- tlakový distribuční dílec (nemusí být vždy),
- vyrovnávací element (vahadlo).



Obr. 11: Axiální ložisko se samo-vyrovnávacími elementy – popis jednotlivých součástí [10]

Pro každý segment jsou potřeba dvě vahadla. To znamená, že např. u 18-ti segmentového ložiska je potřeba 36 vahadel.

Na základě marketingové rešerše bylo vyzorováno několik provedení od světových výrobců a v následujících podkapitolách (2.2.1 až 2.2.3) je představeno několik řešení¹. [9]

2.2.1 Konstrukce s tlakovým distribučním dílcem

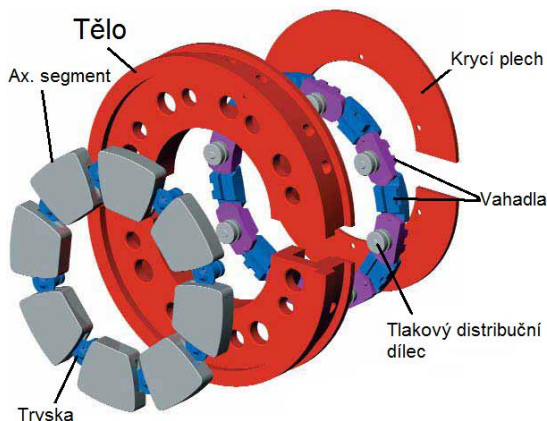
Zdroje: [15]

Sestava axiálního ložiska se samo-vyrovnávacími elementy (obr. 12) obsahuje všechny části zmíněné v kapitole 2.2, kdy je také možnost u této konstrukce použití tenzometrického snímače („load cell“) pro snímání zatížení ložiska.

Uchycení axiálních segmentů je realizováno pomocí trysek. Axiální zatížení je na vahadla přenášeno skrze tlakový distribuční dílec.

¹ Podrobný popis systému vahadel (tj. klíčového dílu) je pak popsán v kapitole 2.3.7

Ložiska s těmito typy vahadel jsou ve světě nejrozšířenější, a proto jsou vahadla navržena na poměrně velkou sériovost. Toto provedení je používáno pro všechny aplikace (pro turbíny, kompresory...) a pro všechny velikosti a možné počty axiálních segmentů v jednom jediném ložisku (6 až 14, případně až 22 – speciální případy = již není katalogové).



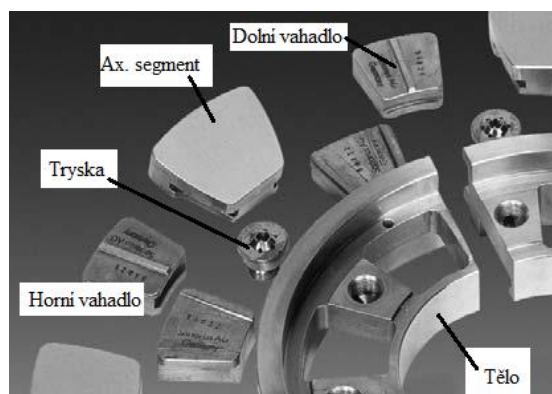
Obr. 12: Sestava axiálního samovyrovnávacího ložiska [15]

2.2.2 Konstrukce bez tlakového distribučního dílce

Zdroje: [23] [26] [27]

Sestava axiálního ložiska se samo-vyrovnávacími elementy (obr. 13) obsahuje všechny části zmíněné v kapitole 2.2, až na tlakový distribuční dílec. Také zde není možnost použití tenzometrického snímače („load cell“) pro snímání zatížení ložiska.

Uchycení axiálních segmentů je realizováno pomocí trysek. Axiální zatížení je na vahadla přenášeno přímým kontaktem s axiálním segmentem. [23]



Obr. 13: Sestava axiálního samo-vyrovnávacího ložiska [23]

Ložiska s těmito typy vahadel, která jsou navr-

žena na poměrně snadnou vyrobiteľnost, se převážně používají v kompresorech, kde se vyskytují většinou 6 až 10-ti segmentová axiální ložiska. Při větším počtu axiálních segmentů logicky vzroste počet vahadel a při počtu 10 segmentů se v axiálním ložisku vyskytuje 20 vahadel, a to se zdá být jako limit pro takovýto tvar vahadel [27].

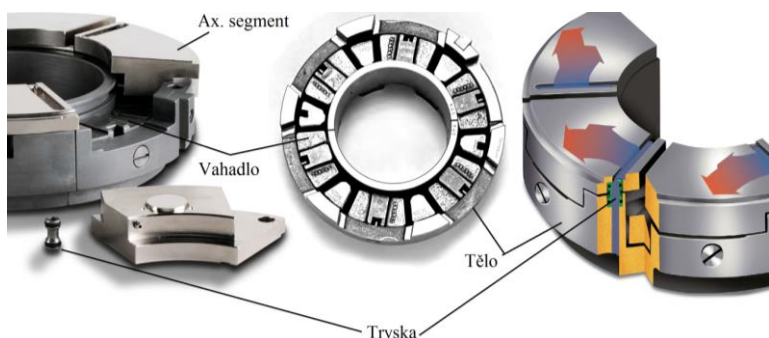
2.2.3 Konstrukce se sférickým tlakovým dílcem zabudovaným v axiálním segmentu

Zdroje: [13] [14] [22] [24] [25] [28]

Sestava axiálního ložiska se samo-vyrovnávacími elementy (obr. 14) obsahuje všechny výše zmíněné části uvedené v kapitole 2.2, až na samostatný tlakový distribuční dílec a krycí plech.

Tenzometrický snímač („load cell“) pro snímání zatížení ložiska, nebo tlakový distribuční dílec je v případě nutnosti zafrézován v axiálním segmentu.

Uchycení axiálních segmentů je pomocí drážek v těle. Trysky zde nezachycují ax. segmenty a mají pouze funkci zásobování ložiska olejem. Axiální zatížení je na vahadla přenášeno přímým kontaktem s axiálním segmentem. [28]



Obr. 14: Sestava axiálního samovyrovnávacího ložiska [13] [14]

Tento typ konstrukce na světě existuje ve třech provedeních, které se víceméně liší pouze ve zpracování a konstrukci vyrovnávacího mechanismu:

- *Standardní.*
- *Válečkové (pro dynamické vychýlení):* Toto do jisté míry stále experimentální provedení bylo vyvinuto z původního „standardního“ provedení, kdy je mezi vahadly vložený váleček.
- *Nízko profilové (SlimLine):* Toto provedení (obr. 15) je speciálně navrženo pro kompresory, nebo pro retrofit energetického zařízení, kde všeobecně bývá problém s prostorem, a tak na základě feedbacku od zákazníků bylo vyvinuto toto provedení.



Obr. 15: SlimLine [22]

2.3 Hlavní části ložiska se samo-vyrovnávacími elementy

V následujících podkapitolách (kap. 2.3.1 až 2.3.7) jsou podrobně popsány hlavní součásti samo-vyrovnávacího ložiska. Na tyto kapitoly dále navazuje kapitola 3, která na dané součásti pohlíží z hlediska technologičnosti konstrukce.

2.3.1 Axiální segment

Zdroje: [29] [28]

Axiální segment je jednou z klíčových částí na ložisku a na kvalitu výroby je kladen nejvyšší možný důraz.

Axiální segment se skládá ze dvou až tří částí a to: tělo segmentu, kompozicové výstelky a volitelně pak také i ze sférického tlakového dílce (obr. 16). [28]

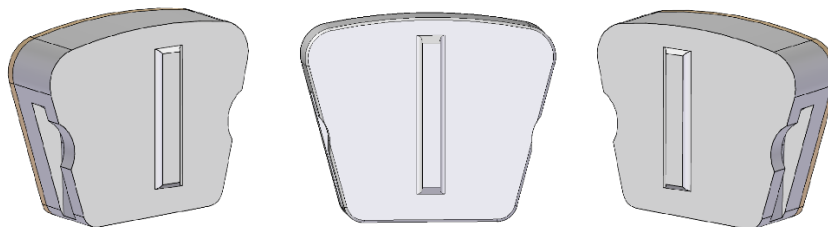
Každá část axiálního segmentu je z jiného materiálu a při obrábění se toto musí samozřejmě zohlednit.



Obr. 16: Části axiálního segmentu [28]

Kompozicová výstelka je na axiální segment nanášena statickým litím a vazba mezi tělem kompozicí je na chemické bázi (tzv. chemical bond proces), kdy cín difunduje do železa a vytvoří mezivrstvu $FeSn_2$. Přílnavost kompozice se kontroluje nejčastěji ultrazvukem dle ISO 4386-1 a povrch kompozice kapilárním testem dle ISO 4386-3.

Tolerance tloušťky segmentu se pohybuje v řádu tisícín milimetru a drsnost funkčních ploch nesmí přesáhnout $Ra\ 0,4$ (standard je $Ra\ 0,2$). Funkční plochy se vyskytují na segmentu dvě: plocha, na které se vytváří olejový film (je zde kompozicová výstelka) a plocha, na které se axiální segment naklápí (tzv. pivot = kyvný bod/přímka segmentu). Tento pivot je pak dle potřeby ve prostřed (obousměrná varianta), napravo nebo nalevo (jednosměrné varianty) – viz obr. 32.

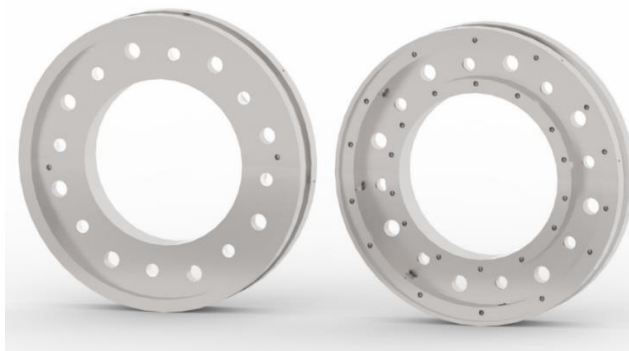


Obr. 17: Varianty provedení pivotu jednosměrná (vpravo a vlevo) a obousměrná (uprostřed) [autor]

Obrábění probíhá z důvodu produktivity vždy na CNC obráběcích strojích s minimálně čtyřmi osami, kde se jako polotovar používá „předlitý“ bimetalový pás.

2.3.2 Tělo ložiska

Tělo ložiska (obr. 18) slouží jako klec, které celou sestavu drží pohromadě. Na tělo nejsou kladeny zvláštní požadavky na pevnost, protože není pod velkým zatížením. Jako materiál se používá ušlechtilá uhlíková ocel.



Obr. 18: Tělo ložiska – vlevo: strana kde jsou axiální segmenty, vpravo: strana kde jsou vahadla [autor]

2.3.3 Tryska

Tryska (obr. 19) slouží k zásobování ložiska olejem a v případě standardní konstrukce GTW BEARINGS také i k uchycení axiálních segmentů.

Stejně jako tělo ložiska, tak i na trysku nejsou kladeny moc vysoké materiálové nároky, protože není pod velkým zatížením. Jako materiál se běžně používá automatová ocel.

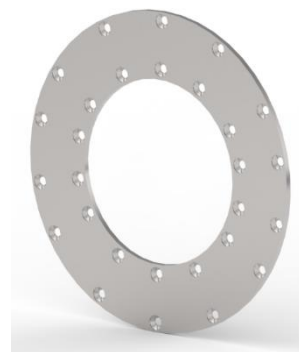


Obr. 19: Tryska [autor]

2.3.4 Krycí plech

Krycí plech (obr. 20) slouží jako kryt pro vahadla. Skládá se ze dvou výpalků a nejsou na ně kladeny zvláštní požadavky. Výpalek je pouze žíhaný na odstranění pnutí, aby se zabránilo kroucení materiálu. Jako materiál se používá běžná konstrukční ocel (S355/11523).

Technologicky je to velice jednoduchá součást, která má přísněji tolerovanou pouze tloušťku. Tloušťka se na přesný rozměr dobrušuje.



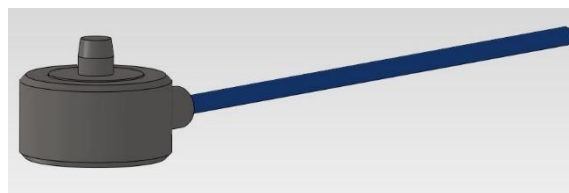
Obr. 20: Krycí plech [autor]

2.3.5 Snímač zatížení

Zdroj: [30]

Tenzometrický snímač neboli „load cell“ (obr. 21) pracuje na bázi tzv. piezoelektrického jevu, kdy je integrovaný krystal schopen při deformování generovat elektrické napětí.

Slouží pro snímání skutečného zatížení konkrétního axiálního segmentu v ložisku. Slouží jako



Obr. 21: Tenzometrický snímač [30]

ověření, že každý segment je (pokud možno) rovnoměrně zatěžován a systém vahadel pracuje správně.

Zde je potřeba mít na mysli jen to, že čím je snímač menší, tím je naopak dražší. Je to dáno tím, že menších snímačů se musí vyrobit více než je požadované množství z důvodu vyššího procenta chyb při výrobě a také, že menší snímače jsou výrobně obtížnější. [30]

Ve světě existuje jen velmi málo výrobců, které jsou schopni vyrobit takto specifický snímač, který navíc „pasuje“ do velice stísněného prostoru v ložisku.²

2.3.6 Tlakový distribuční dílec

Zdroj: [15]

Tlakový distribuční prvek se může (ale nemusí) v axiálním samo-vyvažovacím ložisku vyskytnout. Záleží na konkrétní konstrukci ložiska. Pokud axiální segment obsahuje sférický tlakový díl (kapitola 2.3.1), tlakový distribuční prvek se v ložisku nevyskytuje a naopak.

Funkce tlakového distribučního dílce je přenést zatížení z axiálního segmentu na sestavu vahadel. [15]

Jedná se o poměrně jednoduchou součást, která má pouze přísně tolerovanou celkovou výšku.

Na tomto dílci jsou dvě funkční plochy. Jedna plocha je v kontaktu s axiálním segmentem a tvoří tzv. pivot (kyvný bod segmentu). Druhá plocha je v kontaktu s vahadlem. Obě tyto plochy jsou namáhané na tlak a vzdálenost mezi nimi musí být v toleranci v řádu stovek (spíš tisíců) mm.

Pro výrobu tlakového distribučního dílce (obr. 22) se používá tvrdá zušlechťená chrom-molybdenová ocel o vysoké pevnosti a tvrdosti, aby nedošlo při vzájemném kontaktu s vahadly (popř. axiálními segmenty) k opotřebení. [15]



Obr. 22: Tlakový distribuční dílec [autor]

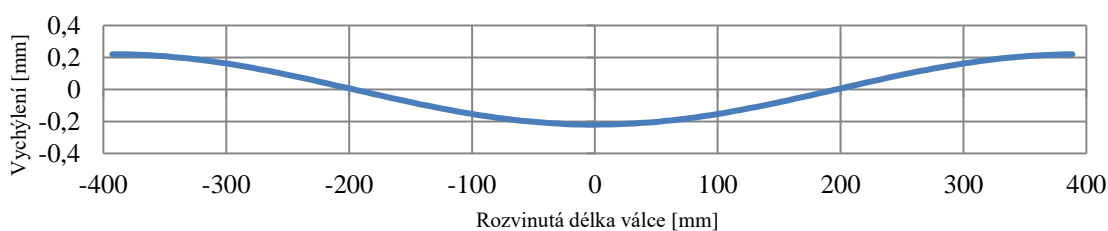
² I zde ale je potřeba vyvíjet určitý tlak na možnost ovlivnění technologičnosti konstrukce tenzometrického snímače.

2.3.7 Vyrovnávací element (vahadlo)

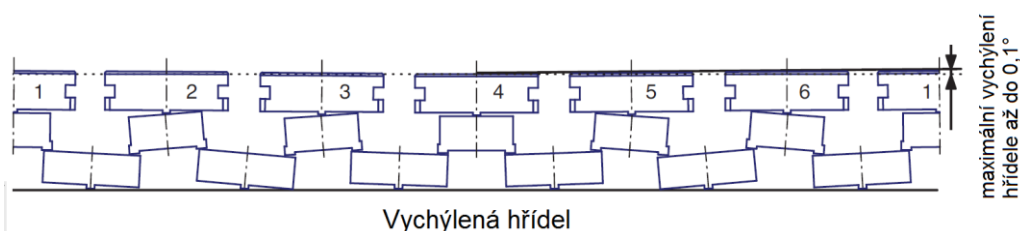
Zdroje: [10] [13] [14] [15] [22] [23] [26] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37]

V axiálním samo-vyrovnávacím ložisku je vyrovnávací element (vahadlo) nejdůležitějším (a také kritickým) dílcem sestavy. Sestava vahadel (obr. č. 24) má za úkol rovnoměrně rozložit zatížení po celém obvodu ložiska (všechny jednotlivé segmenty). Rovnoměrně rozložené zatížení je poté přenášeno do domečku ložiska a následně do rámu stroje. Jsou na něj kladeny vysoké materiálové a rozměrové nároky. V závislosti na rozdílu velikosti mezi malým a velkým průměrem mezikruží aktivní plochy límce se počet vahadel v sadě pohybuje standardně mezi 12 (6 horních a 6 dolních) až >44 (>22 horních a >22 dolních) vahadly.

Pokud bychom chtěli kruh s vahadly natáhnout na přímku – linearizovat, ideální průběh výšky vahadel by se podobal tomu, který je znázorněn na obr. 23 – linearizovaný řez válcem – při vychýlení límce rotoru $0,1^\circ$ (v tomto případě na průměru 250 mm). Kinematický obrazec by potom vypadal tak, že největší naklonění vahadla (horního i spodního) by bylo při nulové výšce (v dělicí rovině – pod segmenty 2, 3, 5, 6 na obr. 24), naopak nejmenší naklonění (v ideálním případě žádné) by bylo v tomto konkrétním případě ve výšce 0,218 mm (pod segmenty 1 a 4 na obr. 24). [10]



Obr. 23: Průběh pozic vahadel po linearizaci [mm] [33]



Obr. 24: Princip naklonění vahadel [26]

Pro zvolení funkční geometrie vahadla je potřeba nadefinovat vhodný kinematický model. Teoretickou pohyblivost rovinné soustavy těles, resp. její počet stupňů volnosti n , vypočítáme z obecně platné vazbové rovnice:

$$n=3(m-1)-2(r+p+v)-1o, kde$$

n ...počet stupňů volnosti rovinné soustavy těles,

m ...počet všech těles rovinné soustavy včetně rámu,

r, p, v, o ...počet rovinných KD (kinematických dvojic) rotačních, posuvných, valivých a obecných. [36]

Pokud bychom ale chtěli takovýto model nadefinovat dle reality, vzniknou všude obecné vazby (odvalování se třením). Takovýto model, např. se 36-ti vahadly, by pak měl 36 stupňů volnosti a byl by téměř neřešitelný běžnými výpočetními nástroji.

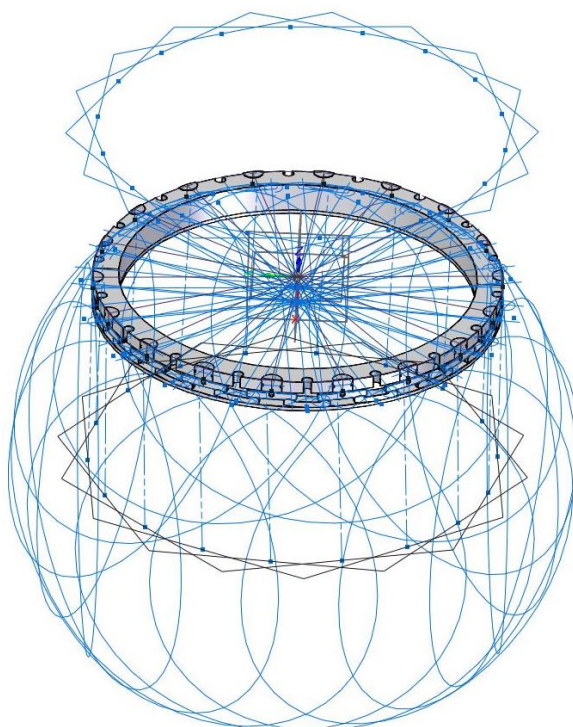
$$n=3(37-1)-2(0+0+0)- 72=\underline{36}.$$

Proto je potřeba jej zjednodušit a některé obecné vazby nahradit odvalováním. Jedním z řešení by mohl být kinematický koncept, kdy je kontakt horního vahadla s tlakovým distribučním prvkem a kontakt spodního vahadla s rámem (v tomto případě krycím plechem) řešen jako valivá vazba.

$$n=3(37-1)-2(0+0+36)- 36=\underline{0}.$$

Takováto soustava je staticky určitá a výpočet je již „uchopitelný“. Dráhu pohybu jednotlivých bodů na vahadle lze sledovat pomocí *cykloid* (obr. 25) a polohu jednotlivých vahadel tak již lze učít.

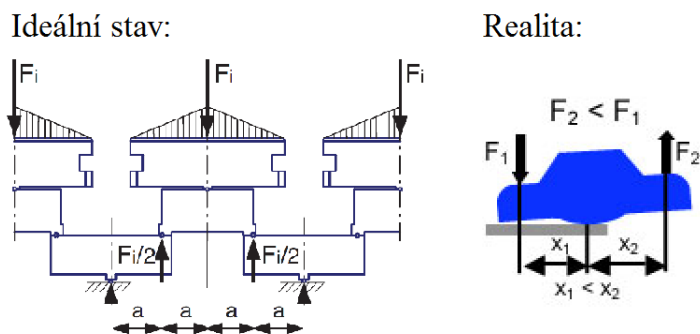
Toto zjednodušení je samozřejmě potřeba podpořit co možná nejvhodnější geometrií vahadla, která toto odvalování bude podporovat. V případě čistého odvalování jsou také minimalizovány pasivní odpory vzniklé třením. Na takovou geometrii je ale dále nutné použít vhodné nástroje technologičnosti konstrukce – co nejjednodušší tvar, tvar vyrobitelný na stávajícím výrobním zařízení atd., které jsou protichůdné. – viz kapitola 3.3).



Obr. 25: 3D kinematický model ložiska s 18 segmenty (36 vahadel) s vazbami řízenými cykloidami – odvalování [autor]

V ideálním případě by síly působící na vahadla měli být všude stejné, ale z důvodu pasivních odporů, nevhodné geometrie vahadel, ale i odvalování samotných vahadel, kdy se mění ramena

sil a tím pádem i momenty, jsou tyto síly klesajícího charakteru (obr. 26). [34] Jakost kontaktních ploch, ale i celková mikrogeometrie vahadla/vahadel, jsou proto velice důležité atributy pro celkovou technologičnost konstrukce.



Obr. 26: Rozložení sil na vahadle – ideální stav [26] vs. realita [34]

Je evidentní, že zde dochází k mnoha kontaktům s relativně malou plochou styku. Nerozhoduje totiž geometrická plocha, ale skutečná plocha styku, jež je menší a jen výjimečně se rovná geometrické ploše. V ideálním případě dvou dokonale hladkých pružných těles se uplatňují klasické Hertzovy vztahy.

Při kontaktních procesech je třeba uvažovat se základními tvarově-rozměrovými a materiálovými vlastnostmi dotýkajících se částí, jejich vzájemnou vazbou a reakcí mezi nimi. Tyto interakce mohou být materiálové, fyzikální, chemické, aj.

Je proto třeba zvažovat řadu vlivů:

- počet těles zúčastňujících se kontaktního procesu,
- makrogeometrii a mikrogeometrii kontaktních těles,
- fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti těles tvořících celkový systém,
- charakteristický druh deformace mezi jednotlivými tělesy,
- typ a rychlost vzájemného relativního pohybu. [32]

V případě neuvažování těchto vlivů dochází k nežádoucímu opotřebení vahadel (obr. 27). [37]



Obr. 27: Opotřebení vahadel v případě nedodržení výše zmíněných zásad [13], [37]

V neposlední řadě je velice důležitá přesnost jednotlivých vahadel, ale i celková přesnost vahadel v sestavě (v rozměrovém řetězci). Dle prvotních propočtů a nákrešů ve 2D skicích a 3D

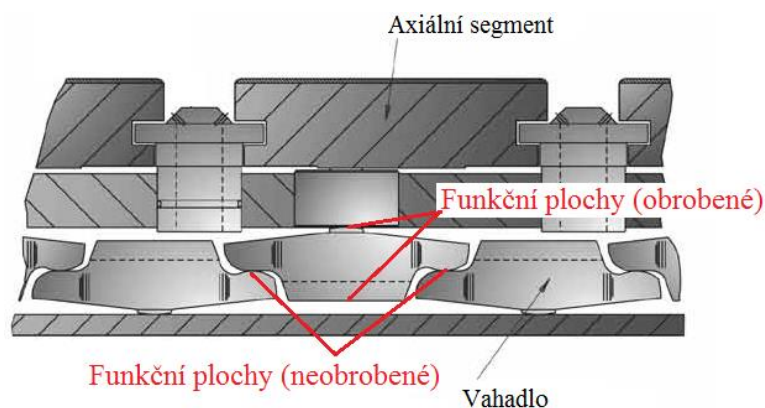
modelech musí být výška vahadel (v případě sestavy se 36 vahadly) v toleranci 0,025 mm. Celá sestava vahadel je extrémně citlivá a jakákoliv odchylka od jmenovitého rozměru vahadla v rozsahu víc jak 0,025mm vede k nefunkčnosti celé sestavy. To klade velmi vysoké nároky na výrobu a montáž.

Na základě těchto znalostí nabízí světoví výrobci několik variant vahadel (viz následující odstavce, které nabídnou srovnání různých³ přístupů k dané problematice).

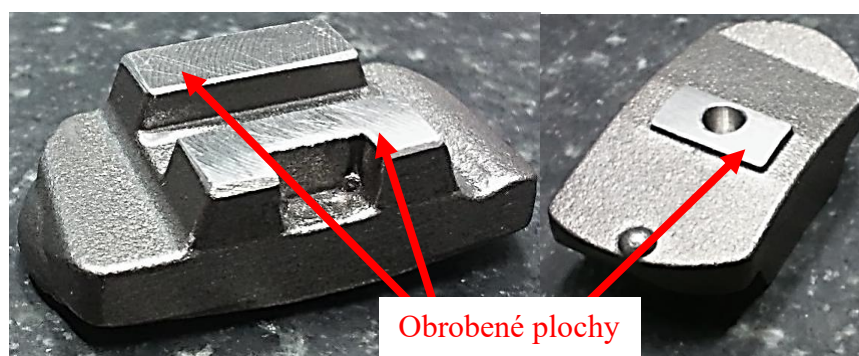
Tvarově složitá vahadla odlitá z oceli na odlitky

Tyto vahadla jsou navržena na velkou sériovost. Jako polotovar je zde zvolen přesný odlitek z martenzitické korozivzdorné oceli na odlitky s mezí pevnosti až 1100 MPa a kluzu až 1000 MPa). Z důvodu snadné montáže je celá konstrukce vahadla uzpůsobena tak, aby bylo možné použít stejné vahadlo jak nahoře, tak i dole = horní a spodní vahadla jsou identická. [15]

Na vahadle jsou obrobene pouze dvě plochy – kyvný bod (broušením) a technologická základna potřebná pro nabroušení tohoto kyvného bodu (frézováním). Další funkční plochy jsou neobrobene (!) – například styčné plochy mezi jednotlivými vahadly – viz obr. 28 a 29.

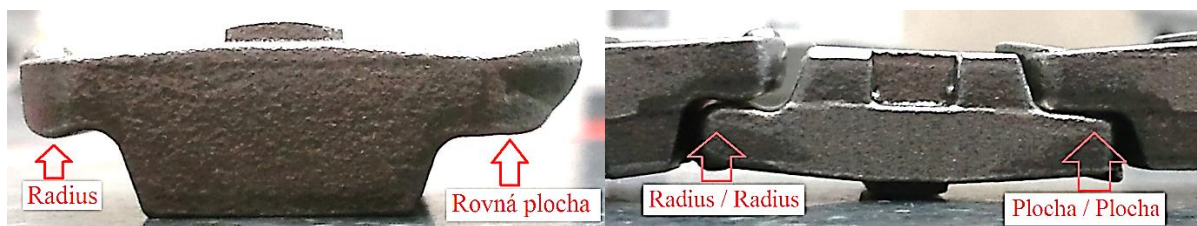


Obr. 28: Skica sestavy vahadel [15]



Obr. 29: Detail na obrobene plochy vahadla [autor]

³ Tzn., diametrálně rozdílných způsobů, jak k problému přistoupit – geometrií začínaje, materiálem a celkovou technologií výroby konče...



Obr. 30: Profil vahadla (vlevo), sestava vahadel (vpravo) – kontaktní dvojice [autor]

Při pohledu z profilu obr. 30 na vahadlo a zjištění, že stejné vahadlo se vyskytuje nahoře i dole je zřejmé, že styčné plochy spodního a horního vahadla jsou ve dvojicích *Rádus/Rádus* a *Rovinná ploch/Rovinná plocha*. Komentář k těmto dvojicím je uveden v kapitole 3.3.1.

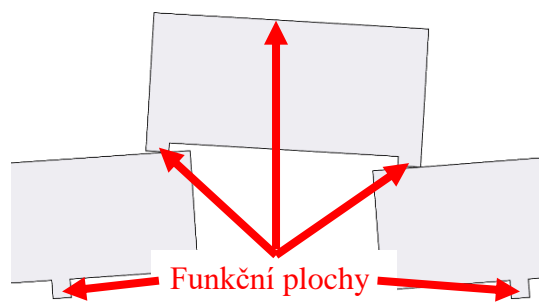
Tvarově jednoduchá vahadla vyrobená obráběním tyče/plechu

Zdroje: [10] [23] [35] [27]

Vahadla (obr. 31 a 32) jsou navržena na poměrně snadnou vyrobiteľnost (jako polotovary je zde zvolen plech, nebo tyč ze zušlechtilé chrom-molybdenové ocele s mezí pevnosti až 1300 MPa a kluzu až 900 MPa). [23]

Vahadla jsou kompletně obrobená frézováním a funkční plochy (kyvné body) jsou broušené. Tvar spodního vahadla oproti hornímu je rozdílný.

Na vahadlech se nevyskytuje ani jeden rádius a všechny plochy jsou rovné (obr. 31) To je sice rozumné z hlediska zdánlivého (!) snížení Hertzových tlaků a celkově snadnější vyrobiteľnosti/obrobitelnosti při dodržení přísných tolerancí, ale z hlediska kinematiky a určitého (nezanedbatelného) odporu, který vzniká při naklopení kyvných ploch vahadel, se to již jako vhodné řešení nejeví. Při bližším zkoumání geometrie vahadel firmami Doosan Škoda Power a GTW BEARINGS se dospělo k závěru, že ani použití rádiusů nepřinese očekávané zlepšení. [35] [27] Pohyb vahadel je u této konstrukce totiž značně omezený díky drážkám, které fixují jednotlivá vahadla. To sebou nese negativní následky. [10] Komentář k těmto dvojicím je uveden v kapitole 3.3.1



Obr. 31: Profil vahadel při vychýlení [autor]



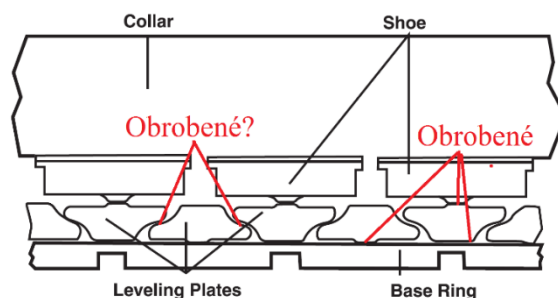
Obr. 32: Detail na vahadla fixovaným pomocí drážek v těle ložiska [autor]

Tvarově jednoduchá vahadla odlitá z oceli na odlitky

Zdroje: [22] [31] [24] [25] [28]

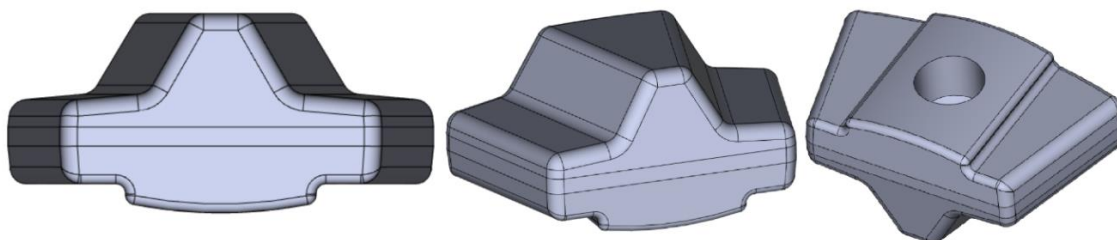
Tvarově jednoduchá vahadla odlitá z oceli na odlitky ve světě existují ve třech základních provedeních:

1. odlitek vahadla broušený na konkrétní velikost (výšku) – *standardní řešení*,
2. odlitek vahadla broušený na konkrétní velikost (výšku) s vloženými válečky – *válečkové řešení*
3. kompletně obrobené vahadlo z tyčového polotovaru – *Nízkoprofilové řešení*. [28] [22]



Obr. 33: Sestava vahadel [28]

- 1. Standardní:** Vahadla jsou navržena na poměrně velkou sériovost (jako polotovar je zde zvolen přesný odlitek z martenzitické korozivzdorné oceli na odlitky s mezí pevnosti až 1100 MPa a kluzu až 1000 MPa). Z důvodu snadné montáže je celá konstrukce vahadla uzpůsobena tak, aby bylo možné použít stejné vahadlo jak nahoře, tak i dole= horní a spodní vahadla jsou identická. Na vahadle jsou minimálně dvě plochy obrobené – kyvný bod (broušením) a technologická základna potřebná pro nabroušení tohoto kyvného bodu (frézováním). Další funkční plochy (styčné plochy mezi jednotlivými vahadly) jsou v některých případech neobrobené a v některých obrobené. [28] Důvod proč tomu tak je, nejspíš vyplývá z historického vývoje, kdy nejprve byly tyto plochy obráběné a posléze na základě testů se od toho upustilo.



Obr. 34: Detail na standardní vahadlo [31]

Při pohledu z profilu (obr. 34) na vahadlo a zjištění, že stejné vahadlo se vyskytuje nahoře i dole je zřejmé, že styčné plochy spodního a horního vahadla jsou ve dvojicích *Rovinná plocha/Rovinná plocha* po obou stranách vahadla. [31] Komentář k těmto dvojícím je uveden v kapitole 3.3.1.

- 2. Válečkové (pro dynamické vychýlení):** Toto do jisté míry stéle experimentální provedení bylo vyvinuto z původního „standardního“ provedení, kdy je mezi upravenými vahadly ze standardního provedení vložený broušený váleček ze zušlechtilé chrom-molybdenové oceli s mezí pevnosti až 1300 MPa a kluzu až 900 MPa. Tento váleček zprostředkovává valivou vazbu mezi vahadly a tím pádem je značně zredukován pasivní odpor mezi vahadly a dochází k lepšímu přenášení zatížení mezi jednotlivými vahadly (obr. 35). Tento teoretický předpoklad byl i následně ověřen experimentálním odzkoušením [24].

Toto provedení výrobce doporučuje v případě dynamického vychýlení – tzn. když se vychýlení projeví, až když stroj nějakou dobu běží – například z důvodu teplotní dilatace.

Z důvodu výskytu, dalšího dílce (válečku) zde mohou nastat určité komplikace oproti standardnímu řešení:

- náročnější na výrobu z důvodu rozšíření tolerančního řetězce,
- náročnější měření,
- náročnější montáž,
- nutnost ztenčení ramena vahadla = riziko deformace vahadla, nebo nutnost zvětšení celkové výšky systému.

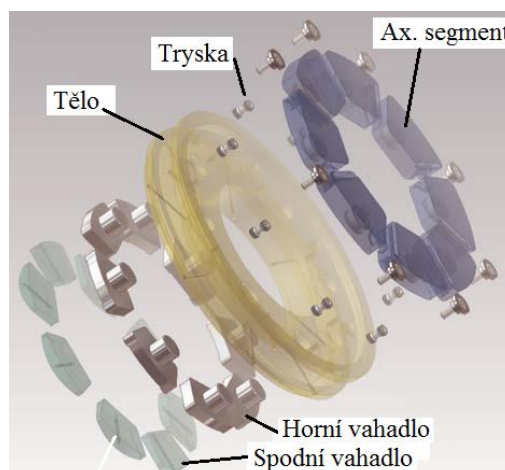


Obr. 35: Sestavy vahadel s vloženým válečkem od různých výrobců [24] [25]

3. **Nízkoprofilové (SlimLine):** Tvar spodního vahadla je oproti hornímu rozdílný (obr. 36). Pohyb vahadel je u této konstrukce rozdílný oproti předchozím konstrukcím. Není zde tlakový distribuční dílec, ale horní vahadlo a „falešný“ tlakový distribuční dílec (válec) tvoří jeden díl, který vykonává pouze lineární pohyb. Naproti tomu spodní vahadlo se nepatrně odvaluje, ale z důvodu fixace vahadla kolíkem spíše probíhá tření mezi spodním vahadlem a krycím plechem. [22]

Styčné plochy spodního a horního vahadla jsou ve dvojicích *Rádus/Rovinná plocha* a *Rádus/Rovinná plocha*, kdy se styčné plochy o sebe třou z důvodu pohybu horního vahadla, který je pouze lineární.

Jako polotovary je zde zvolen plech, nebo tyč ze zušlechtilé chrom-molybdenové ocele s mezí pevnosti až 1300 MPa a kluzu až 900 MPa. [22]



Obr. 36: SlimLine [22]

3 Technologičnost konstrukce

V této kapitole jsou nastíněny všechny požadavky, které jsou důležité pro technologičnost konstrukce axiálního ložiska se samo-vyrovnávacími elementy. Pomocí těchto požadavků, které jsou aplikovány na konkrétní díly, jsou nastíněny konkrétní postupy, které byly aplikovány v praktické části disertační práce.

3.1 Technologičnost konstrukce jako přístup k návrhu a výrobě axiálního ložiska se samo-vyrovnávacími elementy

Zdroje: [38] [39] [40]

V podmínkách celosvětové konkurence se ukazuje koordinace činností při výrobě strojírenských výrobků jako nezbytná. Oddělená činnost jednotlivých útvarů (konstrukce, technologie, metalurgie...) v rámci podniku většinou vede k nevhodným alternativám výrobku včetně navrhovaných materiálů.

Kvalitní konstruktér by měl mít dobré znalosti z technologie, aby věděl, co v dnešní době je vyrobitelné a co nikoliv (nebo velmi obtížně s rizikem malé konkurenceschopnosti). Na druhou stranu i technolog musí mít určité znalosti z konstrukce, aby byl případně schopen svými podněty efektivně optimalizovat výrobek. Pokud je ovšem výrobek složitý tak jako axiální ložisko se samo-vyrovnávacími elementy, musí být brány v potaz i další inženýrské obory. Synergií všech strojních inženýrských oborů⁴ se zabývá disciplína zvaná **technologičnost konstrukce**. Technologičnost konstrukce, nesmí být podceňována, jinak to může vézt k vyšším nákladům.

S ohledem na současné podmínky celosvětové konkurence je důležité respektovat tzv. **integrovaný přístup**, jehož významnou součástí je právě respektování zásad technologičnosti konstrukce. Integrovaným přístupem k návrhu a výrobě samo-vyrovnávacího axiálního ložiska, se rozumí integrace marketingového výzkumu, konstrukčního návrhu ložiska, technologie výroby, ekonomiky, řízení jakosti, ekologie, eventuálně dalších složek podílejících se na výrobě a využití ložiska. [39]

Při koncepčním návrhu ložiska je nezbytné vycházet právě z marketingového průzkumu trhu. Průzkum určí bližší vlastnosti ložiska z hlediska technických parametrů, vyráběného množství variant ložisek, teritorií prodeje a dnes většinou i limitních cen ložisek. Tradiční přístup, kdy na základě nákladů plynoucích za návrh a výrobu ložiska je stanovena cena, bez ohledu na trh, lze dnes akceptovat jen výjimečně a v energetickém průmyslu takřka vůbec. [39]

Lze konstatovat, že návrh ložiska, který se řídí technologičností konstrukce musí splňovat především tyto požadavky: [40] [39]

- **Minimalizovat počet a velikost povrchů dokončovaných obráběním.**
Tzn. předepisování nejnižší vyhovující přesnosti, a to jak z hlediska funkčního, tak i technologického. Vytváření ploch, které budou sloužit jako základny pro upínání, tvorbu NC

⁴ technologie, konstrukce, metrologie, jakost, mechanika, hydromechanika, metalurgie, management...

programu a měření. Součást musí splňovat podmínku snadného ustavení a tuhého upnutí na stroji. Ale svou tuhostí i umožnit obrábění intenzivními řeznými podmínkami, které jsou nezbytné pro ekonomiku výroby.

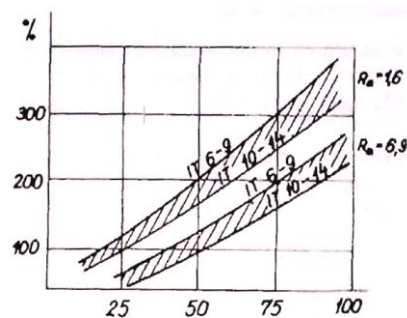
- **Používat díly obsahující tvarově jednoduché konstrukční prvky.**

Tzn. co nejjednodušší konstrukce při splnění požadovaných funkčních parametrů – obráběcí nástroje mají snadný přístup k obráběným plochám, speciální nářadí omezeno na nezbytné případy.

- **Minimalizovat výrobní náklady, pracnost výroby a délku výrobního cyklu vč. montáže.**

Pracnost výroby je určena např. velikostí, hmotností a tvarem opracovaných ploch, kvalitativními požadavky na povrch součásti (drsnost, přesnost, průběhy zpevnění a zbytkového napětí v povrchové vrstvě apod.).

Předepisované kvalitativní požadavky jsou jedním ze základních problémů u pracnosti výroby. Výrobní náklady, resp. pracnost nerostou se zvyšujícími se kvalitativními požadavky lineárně, ale progresivně — viz obr. 37.



Obr. 37: Závislosti relativní pracnosti na stupni přesnosti a drsnosti [39]

- **Vyrábět součástky z polotovárů, které jsou pro daný případ vhodné.**

- **Vhodně zvolit materiál.**

Z hlediska ceny, druhu, materiálových charakteristik (pevnost, tvrdost, korozivzdornost...), tribologických charakteristik (odolnost oproti opotřebení, frettingu...) a v neposlední řadě i technologických charakteristik (obrobitelnost apod.), předpokládaného způsobu výroby, využití materiálu polotovaru, odpadu apod. Tzn. používat drahé, nebo těžko obrobitelné materiály pouze v nezbytných případech. A proto určení vhodného materiálu pro klíčové díly samo-vyrovnávacího ložiska musí být kompromisem mezi výše zmíněnými faktory.

- **Vzít v úvahu aspekty integrity povrchu.**

Integrita povrchu je odrazem podmínek, za kterých plocha vzniká. Bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. Vzájemná relace přesnosti a drsnosti povrchu jsou důležitým aspektem technologičnosti konstrukce. Tvary, rozměry, tolerance, požadavky na kvalitu povrchové vrstvy (průběhy zbytkových napětí a zpevnění, změna mechanických vlastností a struktury apod.), resp. hmotnost součástí určují obráběcí proces, technologický postup a obráběcí stroje.

- **Používat v maximálně možné míře normalizované, unifikované a typizované součástky a tvary nebo konstrukční celky.**

Sériovost je jedním z klíčových hledisek při konstrukci strojírenského výrobku. Sériovost je důležitá též z hlediska návrhu polotovaru jednotlivých dílů výrobku. Zcela jinak je nutné přistupovat ke koncepci výrobku vyráběného velkosériově, resp., hromadně než při

konstrukci několika výrobků. S tím souvisí úzce náklady na konstrukci a celkově na technologickou přípravu výroby.

K metodám konstrukčně-technologické standardizace patří především: **Dědičnost, Simplifikace, Typizace, Unifikace, Normalizace**

- **Tvary ploch musí odpovídat, pokud možno, možnostem stávajícího výrobního zařízení.**

Konstruktér musí znát výrobní možnosti, resp. výrobní zařízení vlastního podniku, v odůvodněných případech i možnostem světové technologie (aby bylo možné nárokovat nákup nového výrobního zařízení, event. realizovat výrobu v rámci kooperace). Výrobní možnosti z hlediska tvarů vyráběných ploch dosahované přesnosti, resp. kvality povrchů se neustále rozšiřují, a proto výrobní zařízení velmi silně ovlivňují celkovou technologičnost konstrukce.

- **Znát požadované kvalitativní parametry – měly by být nezbytně nutné.**

- **Pružná technická příprava.**

Využívání zásad technologické standardizace pro zefektivnění výroby, ale i konstrukce, velmi napomáhají systémy CAD-CAM. Tyto systémy umožňují parametrické definice tvarů součástí i jejich technologií výroby.

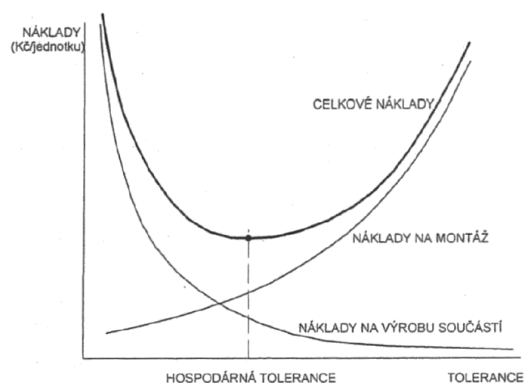
- **Montáž.**

Z hlediska montáže je klíčová jak přesnost délkových rozměrů, tak i tvaru a vzájemné polohy ploch. Rozměry a jejich úchytky se při montáži skládají – tvoří rozměrové řetězce⁵. Součet úchylek může přesáhnout dovolenou celkovou úchytku a tím ohrozit montáž. Přesnější výroba usnadní montáž, ale zvýší se výrobní náklady (obr. 38). Zajištění úspěšné a zároveň hospodárné montáže se provede jen řešením rozměrových řetězců a použitím vhodné metody montáže (metoda absolutní vyměnitelnosti, metoda částečné vyměnitelnosti...).

Tvar součásti by pak měl při montáži usnadnit prostorovou orientaci v sestavě. Proto by měla mít součást tvar buď úplně symetrický, nebo mít výrazný orientační prvek. Dále by měl být na součásti náběh pro usnadnění vkládání, nasouvání, nebo zasouvání.

- **Další požadavky**

Např. z hlediska ekologie, údržby a recyklovatelnosti.



Obr. 38: Závislost výrobních, montážních a celkových nákladů na velikosti rozměrové tolerance [39]

⁵ Rozměrový řetězec je uzavřený okruh (obvod) jednotlivých rozměrů (tolerancí) určujících vzájemnou polohu ploch nebo os součástí. Vyřešení rozměrových řetězců je jednou ze zásadních podmínek proveditelnosti a ekonomiky montáže.

Základním kritériem pro posuzování technologičnosti konstrukce při splnění všech funkčních požadavků jsou pak **výrobní náklady**. Toto hledisko pak může být doplněno dalšími hledisky.

Pro účel analýzy jednotlivých dílů ložiska byly vybrány tyto tematické okruhy, které obsahují již výše zmíněné požadavky:

- **Tvar** (*tvarově jednoduché konstrukční prvky, tvary ploch musí odpovídat možnostem stávajícího výrobního zařízení*).
- **Materiál** (*součástky z polotovaru, které jsou pro daný případ vhodné, minimum povrchů dokončovaných obráběním*).
- **Technologie** (*minimální výrobní náklady a pracnost výroby, integrita povrchu, standardizované součástky a tvary nebo konstrukční celky, znalost kvalitativních parametrů, pružná technická příprava, montáž*).
- **Ostatní** (*ekologie, údržba a recyklovatelnost, jiné požadavky zákazníka*).

Všechna tato hlediska musí být ve větší, či menší míře uplatňována při návrhu a optimalizaci klíčových dílů axiálního samo-vyrovnávacího ložiska. Konkrétnější hlediska technologičnosti konstrukce jsou podrobněji rozepsána a aplikována v následujících kapitolách.

3.2 Technologičnost konstrukce sestavy axiálního kluzného ložiska se samo-vyrovnávacími elementy

Zdroje: [9] [27] [39] [40] [33]

Důvodem posuzování technologičnosti konstrukce před samotnou výrobou je případné odhalení problémů, které by mohli zkomplikovat výrobu. Po dohodě s konstruktérem pak lze odstranit nevyhovující prvky konstrukce. Odstraněním nevyhovujících prvků je pak možné snížit negativní dopad na náročnost a cenu výroby. Vzhledem k již několikrát zmiňovanému faktu, že je celé ložisko ve stádiu vývoje, může dojít ke kompletní změně tvaru vahadel. U procesu technologičnosti konstrukce nového výrobku je toto zcela normální.

V této kapitole je řešena technologičnost konstrukce v rámci sestavy axiálního kluzného ložiska se samo-vyrovnávacími elementy, kde jsou důležité především požadavky na snadnou montáž/demontáž, ale i požadavky zákazníka. V další kapitole je řešena technologičnost konstrukce vyrovnávacího elementu (vahadla). Technologičnost konstrukce ostatních dílů ložiska je v rámci této práce upozaděna a řešena v příloze č. 1.



Obr. 39: Nálitok k snadnému vyjmutí vahadla z těla [autor]

Aby montáž (ale i demontáž) byla co nejlépe proveditelná, je potřeba, aby na některých dílech ložiska byly montážní prvky. Jedním z možných montážních prvků je např. nálitok na vahadle (viz obr. 39). Tento nálitok slouží k snadnému vyjmutí vahadla z těla. Jedná se ale o tvarově složitou plochu, a tak je tento prvek vhodný pouze v případě polotovaru z odlitku. Pokud

bychom totiž chtěli danou plochu obrábět z tyčového polotovaru společně s dalšími tvarově složitými plochami (koule...), tak v rámci technické cenové kalkulace provedené firmou GTW BEARINGS by cena za 1 ks vahadla byla o cca 200,- větší.

Standardní tolerance axiální výšky ložiska je $0/-0,1\text{mm}$. Při pohledu na obr. 40, kde je sestava vahadel, axiálních segmentů a tlakových distribučních dílců (krycí plech, který do celkové tolerance také vstupuje, na obrázku chybí) je jasné, že je zde několikanásobný rozměrový řetězec. Vyřešení rozměrových řetězců je jednou ze zásadních podmínek proveditelnosti a ekonomiky montáže.



Obr. 40: Sestava vahadel s axiálními naklápěcími segmenty a tlakovým distribučními dílci – princip rozložení [27]

V této kapitole je řešena celková axiální výška ložiska. Tzn. toleranční řetězec výšky sestavy vahadel + výška sestavy tlakových distribučních dílců + výška sestavy axiálních segmentů + tloušťka krycího plechu. Toleranční řetězce výšek sestav jednotlivých dílů jsou pak řešeny v následujících kapitolách určených konkrétním dílům ložiska.

S přihlédnutím na cílenou ekonomičnost a jednoduchost montáže, ale také na základě zkušeností firmy GTW BEARINGS s montážemi axiálních ložisek se jako nejvhodnější způsob jeví kombinace dvou metod montáže – *Metoda absolutní (úplné) vyměnitelnosti* (bude aplikována na sestavy jednotlivých dílů – vahadel, ax. segmentů, tlakových distribučních dílců...) a *Metoda lícování* (bude aplikována na celkovou sestavu ložiska již při znalosti absolutních výšek všech sestav).

Kombinací dvou v podstatě protichůdných metod, kdy jedna se hodí pro sériovou produkci a druhá pro kusovou/malosériovou, se dá relativně snadno dosáhnout jinak docela přísné tolerance celkové axiální výšky ložiska $0,1\text{mm}$, kdy může být v tolerančním řetězci přes 70 dílů (v extrémních případech přes 100). Jako tzv. kompenzátor zde bude sloužit krycí plech, který se dobrousí do celkové axiální tolerance.

S ohledem na výše zmíněné skutečnosti je tedy potřeba pečlivě zvážit počet částí v montážním celku a ve výrobku. Pro dosažení žádané funkce výrobku je vhodné použít co nejméně součástí, tzv. optimální počet.

Další požadavek, na který je potřeba se podívat z hlediska sestavy, je standardizace součástí. Vzhledem k tomu, že 70 % částí (axiální segment, tělo ložiska, krycí plech, tryska) již společnost GTW BEARINGS standardně dlouhodobě vyrábí, musí zde být kladen důraz na dědičnost konstrukce. Proto je stanoveno jako priorita, aby uchycení axiálních segmentů bylo pomocí trysek = koncepce GTW BEARINGS (viz obr. 11) a tomu musí být uzpůsobeny další kroky.

V neposlední řadě je důležitý i požadavek zákazníků. Jedním z požadavků, vyjma co nejkratšího termínu doručení finálního produktu, 100% kvality a funkčnosti ložiska, je dle marketingové rešerše i možnost měření zatížení ložiska. [9] Tzn. použití snímače zatížení („load cell“). Vzhledem k takovéto skutečnosti je pak nejvhodnější mít takovou konstrukci, aby byla možnost snímač zatížení zaměnit za tlakový distribuční dílec a naopak.

Další požadavek je na minimální celkovou výšku ložiska. Je to z důvodu potřeby použití těchto ložisek i v retrofitech elektráren, kde jsou často velice omezené zástavové rozměry.

3.3 Technologičnost konstrukce vyrovnávacího elementu (vahadla)

Zdroj: [27] [41] [42] [43] [44] [45] [46]

V kapitole 2.3.7 bylo přestaveno několik koncepcí vahadel. Každý výrobce ložisek zvolil jinou konstrukci (a tím i technologii) a uzpůsobil si ji ke své celkové koncepci produktového portfolia, nebo možnostem výroby.

Z hlediska technologičnosti konstrukce vahadel jako dílu, který je relativně dost namáhán na tlak a ohyb, a který je zároveň součástí rozměrového řetězce, je potřeba se zaměřit na dvě důležité oblasti – *přesnost* (tvarová) a *odolnost vůči otláčení*. V následujících kapitolách je proto vahadlo rozebíráno zejména z pohledu *tvaru*, použitého *materiálu* a možné *technologie* výroby.

3.3.1 Tvar (Geometrie)

V rešerši bylo představeno několik možných tvarů vahadel (rádius vs. plocha) a s tím spojených následných kontaktů. Zde je potřeba najít kompromis mezi dvěma v tuto chvíli proti sobě jdoucími obory a to technologie (technologičnost konstrukce) a mechanika (kinematika).

Požadavky technologičnosti konstrukce z hlediska volby tvaru:

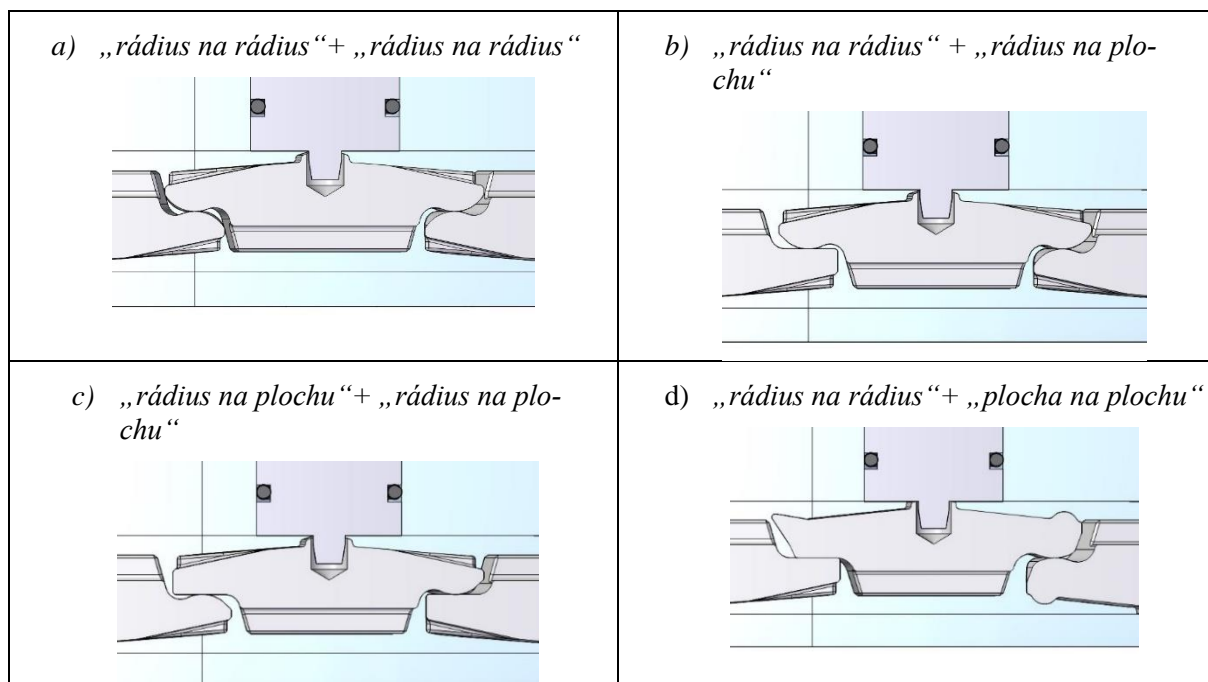
- Použít tvarově jednoduché konstrukční prvky (co nejjednodušší konstrukce při splnění požadovaných funkčních parametrů – obráběcí nástroje mají snadný přístup k obráběným plochám).
- Tvary ploch musí odpovídat, pokud možno, možnostem stávajícího výrobního zařízení.
- Tvar ploch musí změřitelný.
- Použít takový tvar vahadel, aby zde došlo k odvalování vahadel mezi sebou (vložené válečky, nebo evolventní profil vahadel).

Najít kompromis není jednoduché a je nutné provést několik iterací pomocí 3D simulací, než je takový kompromis nalezen.

Ať má ale vahadlo jakýkoliv tvar a profil, je zde nutné dodržet požadavek z hlediska montáže a to, aby tvar vahadla při montáži usnadňoval prostorovou orientaci v sestavě. Proto by mělo mít vahadlo výrazný orientační prvek.

Na základě předchozí rešerše jsou pro následné simulace uvažovány tyto tvary (profily) vahadel a jejich vzájemný kontakt (tab. 1):

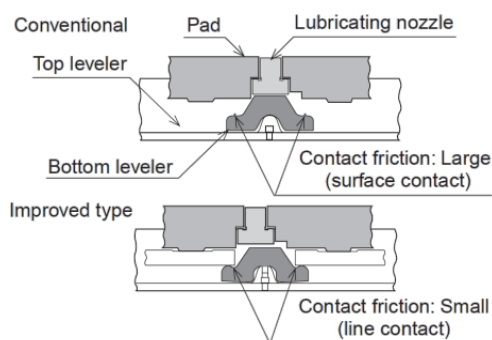
Tab. 1: Uvažované tvary vahadel pro budoucí výzkum



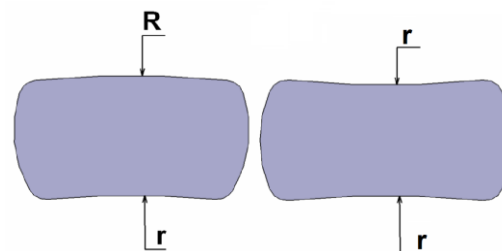
Provedení „Vložené válečky“ a „evolventní profil na evolventní profil“ nejsou v tomto případě moc vhodné k použití z důvodu negativ, která plynou z těchto provedení. „Vložené válečky“ z důvodu nutnosti co nejmenší výšky systému a „evolventní profil na evolventní profil“ z důvodu velice komplikovaného návrhu a výroby.

Jako další provedení, které bylo i zmíněno v rešerši je 2x „plocha na plochu“. Toto provedení, ač technologicky nejméně náročné, nebude realizováno vůbec. Je to z důvodu nedostatečné funkčnosti tohoto provedení v praxi. [27] Tomuto tvrzení nahrává i současný trend, kdy světový výrobci od tohoto provedení upouští a navrhují provedení profilu „rádius na plochu“.

Trochu jiný pohled na tento problém může poskytnout i rozhodnutí o použití jednoho vahadla pro celou sadu (stejně horní i spodní vahadla), či dvou (horní a spodní vahadla jsou rozdílné). Při znalosti výše zmíněných profilů, totiž lze pro případ jednoho vahadla pro celou sadu použít pouze profil „rádius na rádius“, nebo „plocha na plochu“. Je to dáno tím, že vahadla jsou zakřivená do tvaru, kdy horní rádius je



Obr. 41: Návrh změny profilu vahadla v případě firmy Mitsubishi [42] [43]



Obr. 42: Tvar vahadel při pohledu shora – vlevo konvenční tvar, vlevo symetrický tvar [autor]

větší než spodní a oba mají společný střed – viz obr. 42 - vlevo. V případě použití dvou vahadel pro celou sadu (horní a spodní vahadla jsou rozdílné), lze použít jakoukoliv dvojici profilů. Obě varianty (1 vahadlo v sadě, či dvě vahadla v sadě) mají svá pro i proti. Nejvýraznější hledisko je zde ale konečná cena za 1ks vahadla. V případě 18 segmentového ložiska, které má 36 vahadel, je pak rozdíl cca 3500 Kč. Sada vahadel o 36 ks totiž vychází zhruba o cca 100Kč za vahadlo levněji než v případě dvou sad (18 horních a 18 spodních). Tento problém lze v případě nutnosti vyřešit symetrickým tvarem (viz obr. 42 – vpravo), který zaručí použití pouze jednoho vahadla s jakýmkoliv profilem nahoře i dole. Tento tvar má, ale také určitá negativa – jedním z největších je pak, že je o 12-15 % „tenčí“ oproti konvenčnímu designu. Tento tvar zatím nebyl ve světě nikde použit, nicméně z hlediska technologičnosti konstrukce je takovýto tvar vhodný.

3.3.2 Materiál

V rešerši (kapitola 2.3.7) bylo představeno několik možných materiálů vahadel (odlitek z martenzitické ocelolityny vs. ušlechtilá ocel z válcovaného polotovaru) a s tím spojenou následnou technologií výroby.

V rámci technologičnosti konstrukce jsou zde nejdůležitější hlediska technologie a mechaniky (znalosti mechanického namáhání).

Požadavky technologičnosti konstrukce z hlediska volby materiálu:

- Vyrábět součástky z polotovarů, které jsou pro daný případ vhodné:
 - minimalizovat počet a velikost povrchů dokončovaných obráběním,
 - použití pružné technické přípravy,
 - znalost stávajícího výrobního zařízení.
- Zvolit materiál s dostatečnými mechanickými vlastnostmi materiálu:
 - tuhost,
 - tvrdost,
 - únavová pevnost (fatigue strength),
 - odolnost proti korozi třením (fretting).
- Vzít v úvahu aspekty integrity povrchu.

Proti korozi třením (frettingu) lze použít např. tzv. anti-frettingovou vrstvu. Tato vrstva, jejíž hlavním prvkem je měď dále obsahuje alespoň jeden z těchto prvků: germanium, cín, zinek, nikl, kobalt, bismut, olovo, stříbro, nebo antimon. [44] Tento problém se ale dá vyřešit i jinak a to konstrukčně – přivedením dostatečného množství čerstvého oleje k zajištění mazáním mezi kontaktními plochami – to by tento problém mělo dle mnoha studií vyřešit. [45] Proto i na toto musí být při konstrukci brán zřetel.

Při volbě materiálu je pak logické postupovat v těchto třech krocích:

- 1) Volba polotovaru.
- 2) Volba materiálu.
- 3) Volba povrchového zpevnění.



3.3.2.1 Volba polotovaru

Na základě vstupní rešerše (viz kapitola 2.3.7) a při zohlednění výše zmíněných požadavků, se prozatím nabízí několik možných řešení, jaký polotovar zvolit. Vyrovnávací element může být vyroben z ocelolitiny, plechu, tyče nebo výkovku. Na základě zvoleného polotovaru se pak samozřejmě dále odvíjí druh materiálu a následná technologie obrábění vč. přípravků.

Pokud bychom hleděli z hlediska technologičnosti konstrukce pouze na první požadavek, tzn. „Minimalizovat počet a velikost povrchů dokončovaných obráběním“, volba polotovaru by padla na odlitek, ale vzhledem k povaze výrobku se nikdy nebude jednat o velkosériovou výrobu. Naopak jako priorita je zde široká rozměrová variabilita a celková pružnost výroby (i návrhu). Finální koncept by pak měl být pro všechny stroje stejný – jak pro turbíny (nové i retrofity), tak pro kompresory aj. Z tohoto důvodu se zdá být použití odlitku jako polotovaru nevhodné. Každý jednotlivý návrh v budoucnu by musel mít minimálně 1 formu na odlitek. To znamená, že pro každý návrh ložiska by se musela navrhnout i forma pro odlitek vahadel, což je časově velice náročné. Vzhledem k současnému trendu, kdy po obdržení objednávky musí být takovéto ložisko hotové za maximálně 4 (ale spíše 3) měsíce, těžko proveditelné. Další negativum jsou pak náklady na skladování forem odlitků pro případné budoucí využití.

Vysvětlení, proč někteří výrobci přesně litá vahadla i přes tyto negativa používají, je pak jednoduché. Tyto výrobci se snaží rozměry ložisek standardizovat a nutí výrobce strojů se přizpůsobit jejich katalogu. Ve většině případů je to proveditelné, ale například v případě retrofitů strojů, kde jsou již rozměry dané, je takovýto problém někdy téměř neřešitelný.

Podobný problém pak nastává v případě použití výkovků. Zde by musela být pro každé vahadlo navržena sada zápusťek.

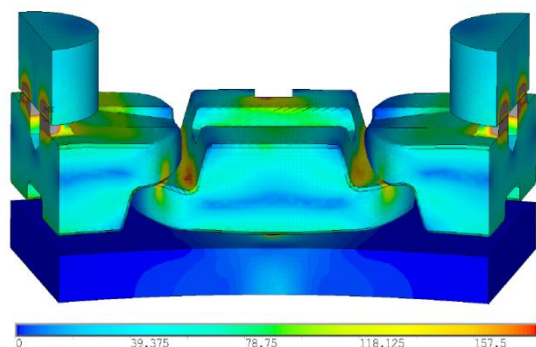
Vzhledem k důrazu na širokou rozměrovou variabilitu a s přihlédnutím k dostupnosti materiálu na trhu se jako nejvhodnější výchozí polotovar jeví válcovaný polotovar – tyč.

3.3.2.2 Volba materiálu

Zdroj: [46] [47] [48] [49]

Pro určení vhodného materiálu je potřeba znát přibližné zatížení jednotlivých vahadel a z toho vyplívajících hodnot napětí, které ve vahadlech vzniknou. Tyto napětí jsou samozřejmě závislé na samotném tvaru vahadla – vše souvisí se vším. Pro účely této práce byl proveden simulační výpočet na prvotním návrhu vahadla, které bude následně tvarově optimalizováno. Tento výpočet je tak pouze *orientační* a slouží jako odrazový můstek pro budoucí výzkum.

Prvotní zadání poskytla firma Doosan Škoda Power a jedná se o reálné hodnoty na jedné z jejich průmyslových parních turbín. Z něho vyplývá, že axiální ložisko o rozměrech $\varnothing 584/\varnothing 448 \times 64$ může



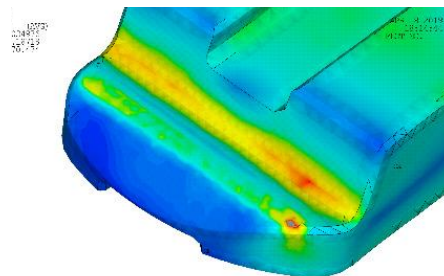
Obr. 43: FEM analýza – rozložení redukovaného napětí (σ_{eff}) na vyvažovacím systému [48]

být standardně zatíženo axiální silou 150 kN. Dané rozměry odpovídají 18-ti segmentovému ložisku. Tzn. 8,3 kN na segment. Jmenovité zatížení ložiska je v tomto případě ~2 MPa. V ideálním případě, kdy samo-vyrovnávací systém vahadel funguje, je to pak 4,15 kN na každou stranu vahadla (v případě zanedbání pasivních odporů i posunů ramen zatěžujících sil daných odvalováním vahadel).

MKP (FEM) statická analýza – HMH (obr. 43 a 44):

Vstupy (okrajové podmínky):

- Dostatečně tuhá podložka.
- Spojité zatížení na obou stranách: $F=12,45\text{kN}$ (bezpečnostní koeficient 3).
- Jemnější síťování v místech předpokládaného zvýšeného napětí.



Obr. 44: Ukázka rozložení redukovaného napětí σ_{HMH} v kořeni ramene vahadla [48]

Výstupy:

- $\sigma_{red} = \sigma_{HMH} = 275,5 \text{ MPa}$.

Analytický výpočet (dle Hertze – válec/plocha): dostupný v [46]a [47]

Vstupy:

- Počítáno s matematickým modelem *Válec/Válec*, kdy jeden válec je „nekonečně velký“.

- Maximální Hertzův tlak $p_{Hmax} = \frac{2F}{\pi bl} = \frac{2F}{\pi \times \sqrt{\frac{2F}{\pi l} \times \frac{(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{1/d_1 + 1/d_2}} \times l}$, kde

F = zatížení; ν = Poissonova materiálová konstanta; E = modul pružnosti; d =průměr válce; l = délka válce.

Výstupy:

- $p_{Hmax} = 2170 \text{ MPa}$.
- $z = 0,2508 \text{ mm}$ (hloubka p_{Hmax}).

Analytický výpočet ohybu:

Vstupy:

- Standardní výpočet ohybového napětí o obdélníkovém průřezu $\sigma_o = \frac{M_o}{W_o}$.

Výstupy:

- $\sigma_o = 121,9 \text{ MPa}$.

Teoretické výpočty bylo potřeba podložit jednoduchým experimentem, a proto bylo provedeno několik destruktivních zkoušek. Tyto zkoušky jsou popsány v příloze 21. Vzhledem k výše zmíněným skutečnostem byla pro účel experimentálního ověření zvolena chrom-nikl-molybdenová zušlechťená ocel (34CrNiMo6).

Co se týče velikosti maximálního tlakového napětí, lze hodnoty považovat za bezpečné, a to i přesto, že tato maxima dosahují hodnot až 2,5násobku meze kluzu (pro použitý materiál v zušlechtném stavu $\sigma_e = 900$ MPa). Maximální tlakové napětí je uprostřed kontaktní plošky, kde je ale prostorová napjatost – všestranný tlak. Ocel takto bezpečně snese tlaky 3.500 až 4.000 MPa, viz například [49].

Praktické použití chrom-nikl-molybdenových, je podloženo dlouhodobou provozní spolehlivostí dodávaných výrobků. Jiný materiál prozatím nebyl a není uvažován. Lze tedy říci, že výběr tohoto materiálu je v souladu s technologičností konstrukce, kdy se nepředepisuje zbytečně nový (nevyzkoušený) materiál.

3.3.2.3 Volba technologie povrchových úprav a povrchových zpevnění

Zdroj: [41]

Vzhledem k výskytu poměrně vysokých Hertzových tlaků při kontaktu vahadla s podložkou a kontaktu mezi samotnými vahadly, se nabízí možnost povrchového zpevnění. V následujících podkapitolách jsou představeny vybrané technologické metody pro dosažení zpevnění povrchové vrstvy. Jde o speciální dokončovací technologie obrábění, nebo metody tepelného a chemicko-tepelného zpracování. Technologie jsou zde pouze obecně popsány za účelem všeobecného přehledu a jejich možné aplikace v praktické části.

Předběžný výběr možných metod byl proveden s ohledem na zvolený materiál v předchozí kapitole 3.3.2.2 a tvar funkčních ploch vahadel.:

- | | | |
|--|---|-----------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Povrchové kalení a cementace.• Nitridování.• Bezproudé niklování.• Válečkování.• <u>Omílání.</u> | } | Konvenční metody povrch. zpevnění |
| <ul style="list-style-type: none">• Laserové navařování.• Žárový nástřik.• Tryskání bez úběru materiálu. | | |

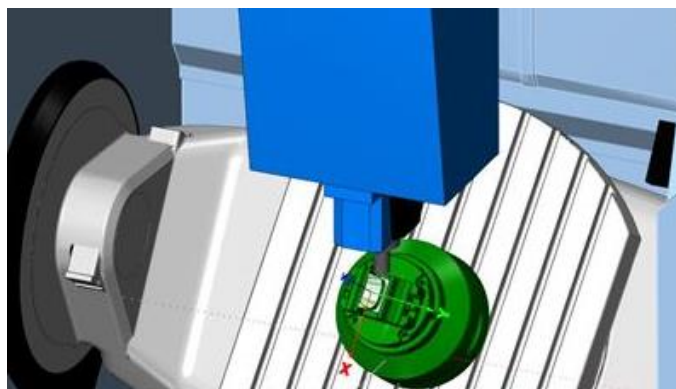
3.3.3 Technologie

Technologie výroby navazuje na předchozí dvě kapitoly. V této kapitole je ve zkratce popsána problematika výroby vahadla od technické přípravy výroby až po finální montáž včetně měření.

Požadavky technologičností konstrukce z hlediska volby technologie výroby:

- Pružná technická příprava výroby.
- Minimalizovat výrobní náklady, pracnost výroby a délku výrobního cyklu vč. Montáže => Znat požadované kvalitativní parametry – měly by být nezbytně nutné.
- Vztít v úvahu aspekty integrity povrchu – z pohledu řezných podmínek a nástrojů.
- Dostatečná přesnost (opakovatelná).
- Možnost jednoduchého/rychlého změření klíčových rozměrů.

Podstatná redukce celkového času i nákladů na výrobu jednoho kusu vahadla nastane již při vhodném použití nástrojů pro pružnou technickou přípravu výroby. Vzhledem k plánované kusové výrobě, kdy finální ložisko by mělo mít univerzální použití, je velice důležité mít parametricky zpracované univerzální modely v CAD. Tyto modely by měli být propojeny s kinematickým nástrojem, pomocí kterého se na základě vstupních dat (velikost ložiska, velikost maximálního vychýlení...) nadefinuje profil vahadel. Takto zpracovaný model v CAD pak lze snadno použít pro generování NC programu v CAM (rovněž parametricky zpracovaný – obr. 45). Při dobře nastaveném systému řízení technické přípravy výroby se dají, uspořit dny (i týdny) příprav.



Obr. 45: Simulace procesu obrábění vahadla na 5-ti osém frézovacím centru v prostředí CAM [41]

Vlastní výroba je vhodná (produktivní) především pro 5-ti osé frézovací centrum. Vzhledem k tvarové složitosti vahadla a použití těžkoobrobitelných materiálu je zde veliký potenciál v optimalizaci procesu obrábění (nástroje, řezné podmínky – HSC/HPC – v_c , f_z , a_p

a_e , způsob upnutí, strategie obrábění...). Tato optimalizace musí probíhat s přihlédnutím na požadované kvalitativní požadavky povrchu funkčních ploch vahadel.

Vzhledem k faktu, že nebylo úplně jasné, jaké jsou ty optimální kvalitativní požadavky na povrch funkčních ploch vahadel (jaká drsnost povrchu funkčních ploch vahadel bude optimální), bylo nezbytné pomocí experimentu tyto skutečnosti zjistit (kapitola 7.3).

Jak již bylo naznačeno v kapitole 3.2, sestava vahadel tvoří uzavřený řetězec, který je nejvhodnější řešit metodou absolutní (úplné) vyměnitelnosti. Tato metoda umožňuje montáž všech součástí, které tvoří jednotlivé články řetězce měř, zhotovených v předepsaných rozměrech a poměrně úzkých tolerancích (určených řešením rozměrových řetězců metodou maxima a minima), bez předchozího výběru, přizpůsobení nebo dolícování, a zabezpečuje plně přesnost uzavíracích členů rozměrových řetězců.



Obr. 46: Měření kritické hodnoty – výšky vahadel

Po dokončení výroby je potřeba vahadlo změřit. Měření by mělo být jednoduché a rychlé. To znamená zkonstruovat přípravek na změření vahadel. Konstrukce tohoto přípravku by měla být univerzální pro všechny rozměry vahadla, které jsou si tvarově podobné.

4 Volba technologie povrchových úprav a zpevnění

Zdroje: [39] [40] [41]

V příloze 2 jsou představeny technologie povrchových úprav a zpevnění, které byly vyjmenovány v kapitole 3.3.2.3. V této příloze jsou popsány jejich výhody a nevýhody. V následujících odstavcích jsou pak vybrány technologie povrchového zpevnění pro následný experiment.

Vzhledem k tomu že v České republice je prakticky nulová vědomostní základna ohledně výroby vahadel, nebylo možné optimalizovat již někde zavedenou výrobu vč. technologie povrchového zpevnění. Bylo potřeba vycházet ze znalostí získaných z marketingových rešerší v kombinaci ze zkušeností s výrobou obdobně namáhaných dílů.

Technologie povrchového zpevnění, která by byla vhodná při výrobě vahadel, by měla splňovat především tyto vlastnosti:

- Téměř nulové rozměrové ovlivnění vahadla
- Dostupnost v plzeňském kraji.
- Zlepšení tribologických vlastností.
- Ekonomičnost.

V roce 2016 byla na toto téma zadána diplomová práce. [41] Tato diplomová práce na téma *Návrh a ověření technologie výroby klíčových komponentů samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska* se konkrétně zabývala návrhem technologie výroby vahadel s ohledem na volbu technologie povrchového zpevnění. Z poznatků této diplomové práce se pak vycházelo výsledné volby technologie povrchového zpevnění.

V diplomové práci byly vahadla vyrobená ze třech materiálů v kombinaci se dvěma a povrchovými zpevněními:

- Nelegovaná zušlechtěná ocel (C45)
 - Povrchové kalení laserem.
- Chrom-nikl-molybdenová zušlechtěná ocel (34CrNiMo6)
 - Nitridace.
 - Povrchové kalení laserem.
- Chrom-molybdenová zušlechtěná ocel (42CrMo4)
 - Nitridace.
 - Povrchové kalení laserem.

Všechny materiály byly v základu zušlechtěny pro dosažení vysoké pevnosti. Nitridace byla vybrána z důvodu rovnoměrné tloušťky vytvořené vrstvy bez nutnosti dalšího opracování. Povrchové kalení laserem bylo vybráno na základě předchozích zkušeností společnosti GTW s výrobou typově podobných dílců namáhaných na otláčení. Praktické použití povrchového kalení laserem zde bylo podloženo dlouhodobou provozní spolehlivostí dodávaných výrobků.

Těchto pět možných variant vahadel bylo následně vyrobeno a procesně zhodnoceno (Příloha č. 3 a 4). Ve výsledku se ale ukázalo, že jediná použitelná varianta pro další zkoumání byla nitridovaná chrom-nikl-molybdenová zušlechtěná ocel (34CrNiMo6).

Jako další technologie povrchové zpevnění bylo vzhledem k vynikajícím tribologickým vlastnostem vybráno bezproudé niklování. Stejně jako nitridaci, tak i bezproudé niklování lze použít až po finálním obrábění načisto bez rizika velkých rozměrových změn výrobku.

Jako jakási alternativa k vlastnímu zaběhnutí vahadel při provozu se pak jeví omílání. I zde nedochází k výrazným rozměrovým změnám. Dochází pouze k úpravě drsnosti a je zde předpoklad, že by mohlo dojít k mírnému zlepšení tribologických vlastností výrobku.

Ostatní technologie povrchové zpevnění, nebo povrchové úpravy nespĺňovali některé z výše zmíněných požadavků, a proto s nimi dále nebylo počítáno.

Pro účel experimentu tedy byly vybrány tyto technologie povrchových úprav:

- Nitridace
- Bezproudé niklování
- Omílání

5 Statistika

Aby byl experiment věrohodný a přinesl co možná nejvíce poznatků současně s dodržením přijatelných nákladů, je potřeba použít takové statistické nástroje, které by tyto požadavky splnily. V následujících kapitolách jsou popsány statistické nástroje, které je vhodné použít v případě vývoje nového produktu.

5.1 Navrhování a vyhodnocování experimentů (DoE)

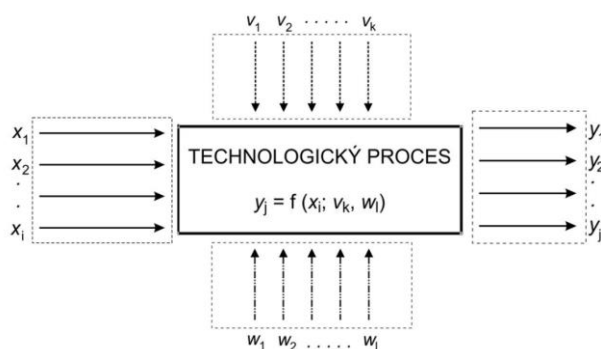
Zdroje: [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56] [57]

Každý proces je ovlivněn celou řadou konkrétních faktorů, které lze aktivně řídit. Na výstupu z těchto procesů je pak očekáván určitý výsledek. Takovému výsledku se pak říká odezva.

DoE (Design of Experiments => plánování experimentů) je pak strategie, při které jsou najednou studovány účinky několika faktorů, prostřednictvím jejich testování na různých úrovních. Úlohou DoE je pak najít takovou kombinaci faktorů, aby odezva procesu byla co možná nejpřesnější. Odezvu je pak zapotřebí sledovat v několika bodech experimentálního prostoru. Sledování každého bodu vyžaduje jak časovou, tak finanční náročnost, a to je důležité si uvědomit. Velmi proto záleží na tom, kolik bodů a jak umístěných v experimentálním prostoru se sleduje. [50]

Dle [52] lze každý experiment rozdělit na následující fáze:

1. Analýza procesu
2. Návrh experimentu
3. Provedení zkoušek ve stanoveném pořadí
4. Analýza výsledků
5. Závěry



Obr. 47: Schéma experimentu podle DoE [50]

kde

x_1, x_2, \dots, x_i

jsou kontrolované faktory

v_1, v_2, \dots, v_k

jsou konstantní faktory (nekontrolované)

w_1, w_2, \dots, w_l

jsou náhodné faktory (způsobují šum)

y_1, y_2, \dots, y_j

jsou závislé proměnné (odezvy systému)

Faktor je proměnná, která vstupuje do experimentu a je nezávislá. Faktory lze rozdělit na *kontrolované, konstantní a náhodné*.

Dle pramenu [50] musí kontrolované faktory splňovat následující podmínky:

- Nesmí být funkcí jiných faktorů.
- Musí být nezávislé => jakýkoliv faktor může nabýt všech hodnot neohledně na hodnoty ostatních faktorů.
- Všechny kombinace kontrolovaných faktorů musí být technicky řešitelné.
- Musí být plně říditelné => v průběhu experimentu jsou konstantní, nebo se mění předem daným způsobem.
- Dle typu zvoleného plánu experimentu (např. centrální kompozitní plán) se musí jednat o spojitou proměnnou.

Základní typy experimentů

Dle zdroje [21] lze rozdělit základní typy experimentů na tyto:

- 2^{k-p} – standardní návrhy (Box, Hunter a Hunter),
- 3^{k-p} – standardní návrhy (Box, Hunter a Hunter),
- návrhy s 2 a 3 úrovněmi,
- centrální kompozitní plány,
- Taguchiho robustně navrhnuté experimenty
- D a A (T) optimální plány,
- Uživatelské plány (custom design) a další.

Při zpracování experimentu této disertační práce bude zvolen jeden z výše uvedených plánů. Jako nejpravděpodobnější se jeví centrální kompozitní plán.

Centrální kompozitní plán

Centrální kompozitní plán, označovaný též jako kombinovaný plán je složen ze tří typů bodů [51]:

- *Centrální body* – Tzv. body ve středu plánu. Jejich význam spočívá např. ve vyjádření čisté chyby měření. Minimální počet bodů je dva. Pouze pokud jsou všechny faktory kvantitativní, tak mohou být centrální body přidány, protože u kvalitativních faktorů neexistuje úroveň nula. Centrální body se nepoužívají pro výpočet efektů faktorů.
- *Krychlové body* – Tyto body jsou v plánu vždy a slouží k výpočtu efektů faktorů. Jejich počet je dán jako $n=2^{k-p}$.
- *Hvězdicové body* – Umožňují výpočet koeficientů v úplném kvadratickém modelu nebo zpřesňují výpočet regresních koeficientů. Počet těchto bodů je $n=2^k$.

Vztah dle DoE normování:

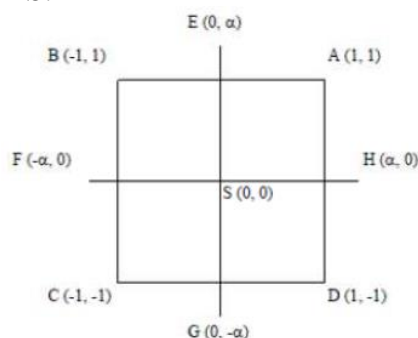
$$x_d(i) = \frac{x(i) - \frac{x_{max} + x_{min}}{2}}{\frac{x_{max} - x_{min}}{2}}$$

kde

$x_d(i)$	je normovaná proměnná podle DoE
$x(i)$	je proměnná x v původních jednotkách, kdy $i = 1, 2, 3, \dots, n$
x_{max}	je horní úroveň $x(i)$ pro kódovanou hodnotu (+1)
x_{min}	je dolní úroveň $x(i)$ pro kódovanou hodnotu (-1)

Je-li každý z faktorů uvažován na dvou úrovních, pak dolní úroveň bude značena -1 a horní úroveň +1.

V centrálním kompozitním plánu jsou dle obr. 48 body krychlové A, B, C, a D, body hvězdicové E, F, G a H a centrální bod S.



Obr. 48: Body obsažené v centrálním kompozitním plánu [51]

Celkový počet bodů v centrálním kompozitním plánu je dán následujícím součtem: *krychlové body + centrální body + hvězdicové*. Kdy k je počet faktorů a p je stupeň snížení, nejnižší možná hodnota p je rovna jedné.

Základy statistického usuzování

Pro matematickou statistiku jsou vstupem data nesoucí informaci, kterou je možné pomocí matematické statistiky vhodně zpracovat a využít. Jakým způsobem se budou data získávat a sbírat, se věnuje statistické navrhování experimentů. Návrh statistických experimentů je složen ze dvou hlavních částí. Z vlastního plánu experimentu a následného statistického vyhodnocení.

Základem navrhování experimentu jsou dva principy:

1. Opakování experimentu, které přináší velice důležitou informaci o chybě experimentu. Při dosažení nižších rozptylů měřených hodnot dává přesnější odhad efektu jednotlivých faktorů, které jsou zahrnuty do experimentu.
2. Randomizace, která zaručuje, že pořadí provedených měření je náhodné. Možnost aplikace statistických metod vychází právě z tohoto předpokladu. [52]

Od formy navrženého experimentu se pak odvíjí analyzování výsledků. Vliv faktorů a jejich interakcí je vyhodnocován v průběhu analýzy. Cílem je vybrat faktory, které mají statisticky

významný vliv na sledované veličiny. Z tohoto důvodu se provádí testování hypotéz (F-test a t-test), regresní analýzy, analýzy kovariance nebo rozptylu apod. Vyhodnocování navrženého experimentu je pak možné považovat za ukončené, pokud se prokáže, nebo popře vliv zkoumaných faktorů na sledované veličiny. [52]

Testování hypotéz

Spolu s metodami teorie odhadu je testování statistických hypotéz jedním z nejdůležitějších postupů statistického posuzování. Aby bylo možné testování hypotéz (parametrické testy) uplatnit, je potřeba splnit předpoklad normality dat sledovaných veličin. [53]

Fisherův test – F-test

U tohoto testu se srovnávají dvě přesnosti v případech, kdy jsou k dispozici data ze dvou různých zařízení. Jedná se například o testování hypotézy, že na jednom pracovišti je vyšší přesnost výroby než na druhém. Nebo že první pracoviště vyrábí s vyšším rozptylem než to druhé. [54]

Studentův t-test

Tento test je nejstarší statistický test pro posuzování shody výběrové veličiny se známou zadanou hodnotou. U tohoto testu se předpokládá normální rozdělení náhodné veličiny. Je využíván pro určení míry pravděpodobnosti, s jakou se porovnávané hodnoty shodují se zadanou hodnotou.

Metoda ANOVA

Metoda ANOVA (z anglického ANalysis Of VAriance) umožňuje ověřit, zda mají sledované faktory statisticky významný vliv na sledované veličiny. Tato statistická metoda spočívá v hodnocení vztahů mezi rozptyly porovnávaných výběrových souborů. Podstatou u této metody je provedení tzv. rozkladu celkového rozptylu na dva dílčí, a to na rozptyl vyvolaný vlivem jednotlivých faktorů a na náhodnou složku označovanou jako šum, u níž lze předpokládat, že právě vzniká náhodně. Testována je pak u této metody statistická významnost poměru mezi těmito složkami. [55] [56]

Scheffeho test

Scheffeho test je tzv. post-hoc (následný) test metody ANOVA, kdy pomocí toho testu lze nalézt při vícenásobném porovnání parametrů, které párové srovnání je významné a které nikoliv. Pokud je zapotřebí porovnat všechny možné jednoduché a složité dvojice, je pro toto porovnání Scheffeho test ideální, protože lze získat užší interval spolehlivosti.

Další vybrané testy

Mezi další testy pak lze například zařadit Leveneho test (homogenity rozptylu), Grubbsův test (vylučování odlehlých hodnot), Fisherův exaktní test. Neparametrické testy jako například Kruskal-Wallisův test rozptylu, nebo Vícenásobný Kruskal-Wallisův test rozptylu (vícenásobné porovnání).

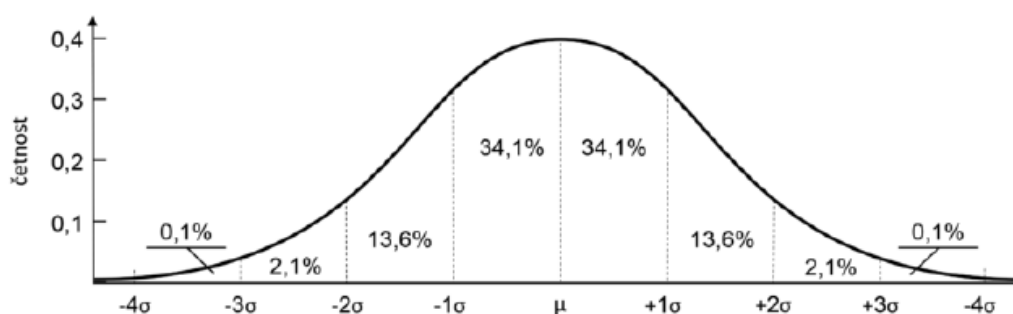
Základní statistická analýza

U základní statistické analýzy naměřených dat je nejprve potřeba ověřit o jaký typ dat se jedná. U dat spojitého charakteru je potřeba nalézt vhodný statický model rozdělení dat. Nejčastěji se jedná o Gaussovo-normální rozdělení (viz obr. 49). Naproti tomu u diskretních dat je situace jednodušší a zpravidla není potřeba provádět žádné ověřování předpokladů.

Normální rozdělení

Normální rozdělení je nejčastější rozdělení u souborů dat spojitého charakteru. Jde o rozdělení symetrického charakteru – hodnoty jsou ovlivněny jen náhodnou chybou a pohybují se kolem střední hodnoty.

V případě, že naměřená data odpovídají normálnímu rozdělení, tak lze při zachování totožných podmínek předpovídat chování sledovaného procesu do budoucna. Další oblast, kde lze uplatnit normální rozdělení je tam, kde měřenou veličinu ovlivňuje velké množství nezávislých navzájem nezávislých vlivů. [53]



Obr. 49: Normální rozdělení-Gaussova křivka [57]

Ze statistického pohledu zpracování dat platí pro normální rozdělení to, že [53]:

- je symetrické, kolem střední hodnoty leží většina hodnot,
- je možné určit procento případů, které spadá do daného intervalu okolo střední hodnoty (např. do 3σ 99,7 %),
- je jednodálí (má pouze jeden vrchol).

6 Cíle disertační práce

Generálním cílem řešení této disertační práce je vývoj funkčního výrobku, který bude vyroben nejvhodnějšími technologiemi pro dané podmínky podniku při akceptovatelných výrobních nákladech a přijatelný výrobní čas. Od tohoto obecného cíle, který je stanoven již zpočátku, se odvíjejí hlavní cíle, které jsou již konkrétní a navazují na teoretickou rešerši.

6.1 Hlavní cíle

Hlavní cíle jsou vytyčeny dva:

- 1) Aplikací nástrojů technologičnosti konstrukce vyvinout takové řešení, které by bylo významně levnější a variabilnější než stávající řešení světových výrobců při zachování funkčnosti ložiska. Řešení bude založené na modulární koncepci. Aby daný výrobek měl modulární koncepci, musí zapadat do stávajícího zařízení – typicky kombinované ložisko (radiální a axiální ložisko) – tzn. jít naproti zákazníkovi a nabídnout komplexní řešení, které bude levnější než jednotlivé komponenty zvlášť.
- 2) Navrhnout metodiku měření maximálního možného vychýlení axiálního samo-vyrovňovacího ložiska – tzn. finální ověření vyrovnávacího mechanismu u konkrétního vyrobeného ložiska.

6.2 Konkrétní (dílčí) cíle

Z hlavních cílů jsou formulovány konkrétní (dílčí cíle):

- 1) Rychle a pružně připravit dokumentaci na výrobu ložiska. Analyzovat rozměrové řetězce – rychlá tvarová analýza z pohledu kinematiky = vytvoření jednoduchého softwarového nástroje pro určení limitních možností konkrétního konceptu (návrhu) => koncept již musí být znám při nabídce – musí být téměř 100% jistota funkčnosti daného řešení.
- 2) Rychlá, pružná a ekonomická výroba ložiska:
 - a) Nalézt takové technologie výroby klíčových dílů, která umožní vyrobení rozměrově rozdílných klíčových dílů při zachování tvarové podobnosti.
 - b) Vybrat nejvhodnější technologie obrábění v návaznosti na integritu povrchu
- 3) Vybrat vhodný materiál vč. tepelného (popř. chemicko-tepelného) zpracování s ohledem na:
 - a) Hertzovy tlaky a celkové mechanické (dynamické) namáhání,
 - b) celkovou obrobitelnost, vyrobitelnost a ekonomičnost výroby.
- 4) Ověřit funkčnost samo-vyrovňání na prototypch ložiska:
 - a) Zjednodušené statické měření maximálního vychýlení ložiska v prostorách GTW BEARINGS.
 - b) Komplexní statické měření maximálního vychýlení ložiska včetně změření rovnoměrnosti rozložení sil na axiálních segmentech.

- 5) Experimentálně ověřit tribologické vlastnosti vahadel
 - a) Jednoduché testy na tribometru
 - b) Komplexní tribologické testy na speciálním standu
- 6) Provést optimalizaci na základě zpětné vazby z jednotlivých měření:
 - a) Tvarová optimalizace.
 - b) Materiálová optimalizace (vč. tepelného / chemicko-tepelného zpracování).
 - c) Povrchová optimalizace (integrita povrchu).
- 7) Ověřit funkčnost prototypů ložiska v experimentálních zařízeních schopných simulovat všechny druhy zatížení působící ložisko, včetně změření rovnoměrnosti rozložení sil na axiálních segmentech.

Jednotlivé body dílčích cílů byly projednány s odborníky z firem GTW BEARINGS, DOOSAN Škoda Power a HOWDEN ČKD Compressors, ale i na pracovištích KTO, KMM a RTI.

6.3 Předpokládané přínosy pro praxi:

- Zavedení určitého standardu měření nesymetricky zatěžovaného ložiska v energetice v České republice.
- Lepší dostupnost nesymetricky zatěžovaného ložiska v České republice při nižších nákladech na jeho pořízení.
- Experimentálně i provozně ověřený český produkt vyvinutý ve spolupráci s předními českými výrobci energetických zařízení.

6.4 Předpokládané přínosy pro teorii:

- Soubor experimentálních výsledků z měření opotřebení staticky a dynamicky namáhaných vzorků s povrchy o rozdílné drsnosti a povrchovém zpevnění vč. konečné interpretace naměřených hodnot vyplývajících z matematicko-statistické analýzy.
- Metodika, jak postupovat při vývoji nového produktu při zohlednění technologičnosti konstrukce.

7 Experiment

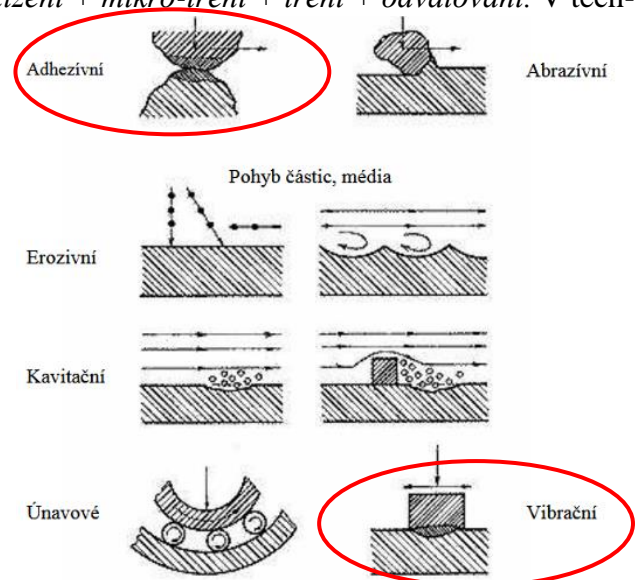
Z rešeršní části této práce je zřejmé, že klíčovými částmi v samo-vyrovnávacím axiálním kluzném ložisku jsou vahadla. Pro bezchybnou funkci tzv. samo-vyrovnání je zapotřebí, aby se horní a spodní vahadla mezi sebou navzájem odvalovala. To ale nelze zcela zajistit, a proto je realita pravděpodobně taková, že vahadla vůči sobě vykonávají obecný pohyb – odvalování se třením. Tento pohyb musí být bezproblémový i po miliónech cyklů. To znamená zvýšené nároky na kontaktní plochu mezi vahadly. Vzhledem k tomu, že takové ložisko je určené převážně do parních turbín nebo turbokompresorů, bude zde docházet k několika formám (kombinacím) zatížení:

- Statické –zatížení je zpravidla známo od výrobce zařízení (turbíny, turbokompresorů) a lze velice snadno spočítat (ale i experimentálně ověřit), zda vahadlo (resp. povrch vahadla) toto statické zatížení vydrží.
- Dynamické –zatížení lze ještě rozdělit do dvou podskupin:
 - Frekvenční – Silně závislé od dominantní frekvence turbíny / turbokompresoru => v případě použití ložiska v turbíně je tato hodnota v Evropě 50 Hz a v USA 60 Hz. Tato dominantní složka frekvence se promítá do vibrací, které jsou v rámci desítek mikronů a mají za následek mikro-tření mezi vahadly a následný tzv. „fretting“ (viz. kapitola 3.3.2 nebo obr. 27)
 - Nahodilé (nezávislé na dominantní frekvenci 50 resp. 60 Hz) – Toto zatížení je závislé na tepelné deformaci celého soustrojí, na celkovém prohnutí hřídele, ale i nepřesnosti ve výrobě. Toto proměnlivé zatížení se projevuje v kontaktu mezi vahadly tím, že vahadla se po sobě odvalují / třou v rámci milimetrů.

Vše se samozřejmě děje naráz => *statické zatížení + mikro-tření + tření + odvalování*. V technické praxi dochází právě velmi často ke kombinaci různých druhů zatížení a tím pádem i k různým druhům opotřebení, např. únavové opotřebení ozubených kol při současném působení abrazivních částic. Dle ČSN 015050 „Opotřebení materiálu“ se opotřebení rozděluje na 6 základních druhů: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační.

U sledovaných vahadel je předpoklad adhezivního a vibračního opotřebení. Schematicky jsou tyto druhy opotřebení znázorněny na obr. 50.

Pokud bychom chtěli povrch vahadla otestovat na dlouhodobou trvanlivost a zatížit ho všemi složkami zatížení naráz, nezbylo by nám nic jiného než postavit jednoúčelové experimentální zařízení. V podstatě turbínu, turbokompresor, nebo jiné zařízení schopné vyvinout všechny potřebné složky zatížení.



Obr. 50: Schematické znázornění různých druhů opotřebení

Vzhledem k tomu, že je nutné najít optimální drsnost a povrchové zpevnění funkčních ploch vahadel, tak je potřeba otestovat několik desítek různých povrchů. To by znamenalo několik desítek dlouhodobých testů ve speciálním zařízení. Takovýto test by byl extrémně zdlouhavý a nákladný. Proto bylo přistoupeno k daleko racionálnější a ekonomičtější variantě, tj. ke kombinaci několika dílčích testů provedených na stávajících zařízeních, ale i na nově postavených zařízeních, která byla zbudována právě pro účel vývoje tohoto typu ložiska v Česku. Až po nalezení optimálního řešení vzešlého z těchto dílčích testů, provést sérii komplexních testů prototypů ložisek v několika experimentálních zařízeních schopných simulovat reálný provoz.

Tyto aktivity probíhaly ve spolupráci s firmami GTW BEARINGS, Doosan Škoda Power, Howden ČKD Compressors, KTO a KMM při FST na ZČU. Testy byly podporovány nejenom z prostředků výše zmíněných organizací, ale také z MPO a Evropské unie.

7.1 Návrh experimentů

Vzhledem k tomu, že se k problematice přistupovalo komplexně, bylo nejprve zapotřebí určit harmonogram prací / experimentů, které na sebe museli logicky navazovat. Časová posloupnost testů proběhla tak, jak je vypsáno níže. Pořadí je dáno celkovou logikou věci, kdy je potřeba si uvědomit, co vše je potřeba brát jako „neznámou“.

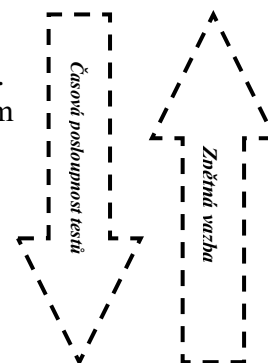
S ohledem na předchozí rešeršní kapitoly (tzn. s ohledem na funkčnost, technologičnost konstrukce ložiska a životnost) je potřeba mezi neznámé zařadit:

- Geometrii a mikrogeometrii vahadel.
- Výrobní toleranci vahadel.
- Materiál / polotovar vahadel.
- Jakost povrchu funkční ploch vahadel s ohledem na jejich životnost (drsnost, tvrdost, ... => integrita povrchu).

V rámci vývoje tohoto typu ložiska v České republice byly postaveny tři speciální experimentální zařízení (tzv. „Standy“) a současně bylo využito několik stávajících měřících zařízení ve vlastnictví GTW Bearings, DOOSAN Škoda Power, Howden ČKD Compressors, KTO a KMM/FST na ZČU.

Přehled testů, jak šly chronologicky za sebou:

1. Test geometrie vahadel (Kapitola 7.2).
 - 1.1. Prvotní jednoduchý test na ověření kinematické funkčnosti ložiska.
 - 1.2. Test na experimentálním zařízení umožňující změřit silové spektrum pod každým segmentem ložiska.
2. Test tribologických vlastností zjednodušených vzorků (Kapitola 7.3)
 - 2.1. Rozřazovací test pomocí metody PIN-ON-DISC.
 - 2.2. Frekvenční zatížení na speciálním tribologickém standu.
 - 2.3. Statické zatížení na lisu.
3. Ověření tribologických vlastností již reálných vahadel (Kapitola 7.4).
4. Statický destruktivní test vahadel (Příloha 21).



5. Ověření funkčnosti ložiska v experimentálních zařízeních schopných simulovat reálný provoz. (Kapitola 7.5).

Po každém testu proběhla diskuze nad výsledky, která fungovala v rámci technologičnosti konstrukce jako zpětná vazba a korekce pro následující testy.

7.2 Návrh a měření geometrie vahadel

V kapitole 3.3.1 byly podrobně popsány všechny možné varianty geometrie vahadel, které jsou z hlediska technologičnosti konstrukce vhodné:

- a) „rádus na plochu“+ „rádus na plochu“,
- b) „rádus na rádus“ + „rádus na plochu“,
- c) „rádus na rádus“+ „plocha na plochu“,
- d) „rádus na rádus“+ „rádus na rádus“.

Aby bylo zcela jisté, která geometrie vahadel⁶ je nejvhodnější z hlediska funkčnosti ložiska, tak byly všechny tyto varianty vyrobeny a otestovány.

Nejprve byly všechny varianty (konstrukční návrhy) otestovány pomocí jednoduššího rozřazovacího testu na ověření kinematické funkčnosti ložiska. Na základě tohoto rozřazovacího testu, byly vybrané varianty změřeny na experimentálním zařízení umožňující změřit silové spektrum pod každým segmentem ložiska. Průběh testů je popsán v následujících kapitolách.

7.2.1 Rozřazovací jednoduchý test na ověření kinematické funkčnosti ložiska

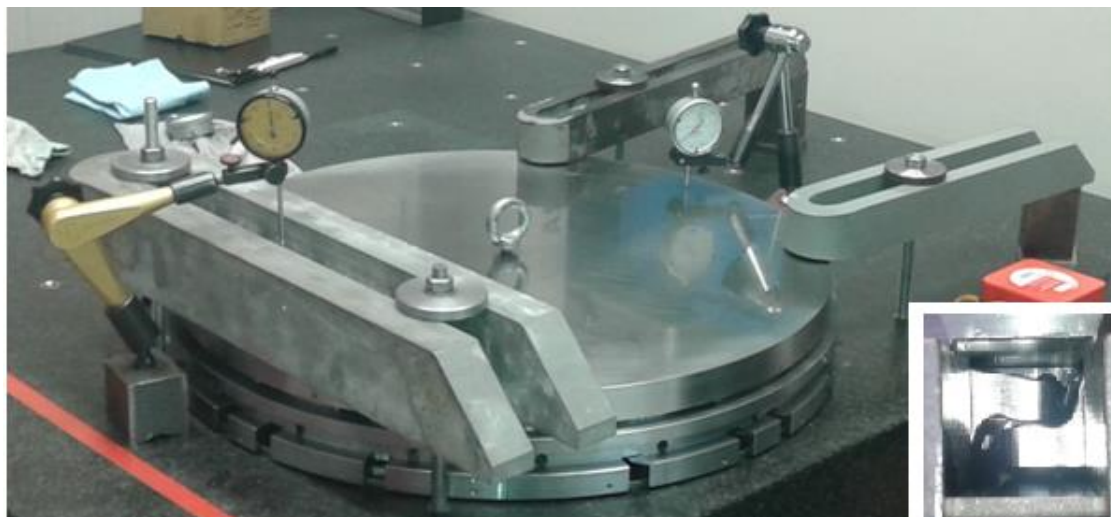
Tento test byl koncipován tak, aby nebylo potřeba složitějších přípravků a zařízení. Sloužil pouze pro prvotní zkontrolování funkčnosti ložiska, kde bylo zjištěno, zda dané sestavení funguje a jaké je jeho maximální vychýlení a zda má cenu se testovanou geometrií zabývat dále. Tento test byl prováděn v prostorách společnosti GTW.

Pro tento test bylo potřeba:

- Granitová deska s rastrovými závitovými otvory.
- Broušená deska o přibližné velikosti měřeného ložiska.
- Sada upínek + závitových tyčí.
- Číselníkové úchylkoměry (min. 2x, ideálně 4x).
- Kruhová libela.
- Spárové měrky / podkladové planžety (0,02mm) pro kontrolu přilehnutí broušené desky k ložisku a pro kontrolu pozice vahadel v tělese.
- Kontrolní ložiskové těleso s vyfrézovanými otvory pro kontrolu pozice vahadel.

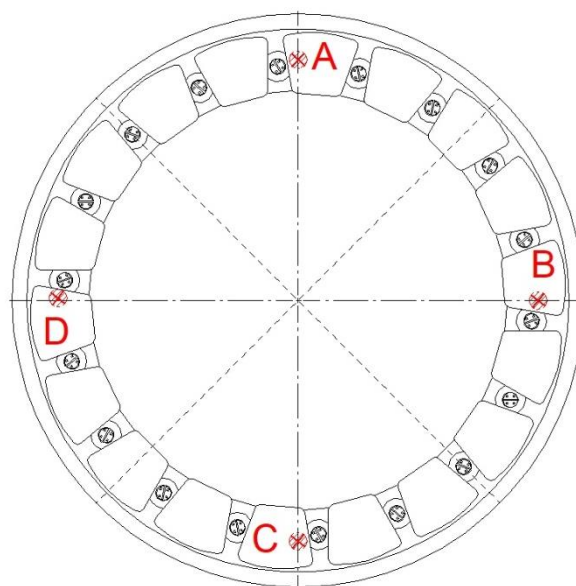
⁶ Geometrie vahadel byla odladěna pomocí 2D a 3D softwarových nástrojů a následně i na základě prvotních měření – viz příloha č 6. Velikost těchto rádií a celkově detailní geometrie vč. maximální výrobní tolerance je součástí know-how společnosti GTW Bearings a proto v této práci nebudou popisovány úplné detaily.

Jako referenční ložisko bylo zvoleno ložisko s 18-ti segmenty na roztečné kružnici 516 mm, které svojí velikostí a počtem segmentů představuje *vrcholnou řadu* samo-vyrovnávacích ložisek určených pro průmyslové turbíny.



Obr. 51: Základní sestavení se dvěma číselníkovými úchylkoměry + detail na otvor pro kontrolu pozice vahadel [autor]

Měřené ložisko bylo rozděleno na 4 kvadranty (viz obr. 52). Každý kvadrant byl postupně zatížen. Maximální vychýlení ložiska se pak sledovalo v kvadrantu, který byl zatížen a dále pak v kvadrantu, který byl naproti tomuto zatěžovanému kvadrantu. Princip měření maximálního vychýlení tedy spočíval v kontinuálním zatěžování ložiska skrze broušenou desku pomocí upínky na jedné straně (např. kvadrant „A.“) a kontinuálním odlehčováním ložiska skrze broušenou desku pomocí upínky na straně druhé (v tomto případě by to pak byl kvadrant „C“.). Aby nedocházelo ke ztrátě kontaktu ložiska s broušenou deskou, byl tento kontakt kontrolován pomocí spárové měrky i tzv. na průsvit. Hodnota vychýlení se odečetla na číselníkových úchylkoměrech. Hodnoty na číselníkových úchylkoměrech se lišili v rámci stovek mm. Tento rozdíl, je přičítán k celkové deformaci sestavy. Před prvním měřením byla broušená deska vyrovnána pomocí kruhové libely.



Obr. 52: Rozdělení na 4 kvadranty [autor]

Výhody tohoto způsobu měření:

- + Rychlé sestavení pro měření
- + Levné
- + Relativně přesné

Nevýhody tohoto způsobu měření:

- Nelze změřit zatěžující sílu
- Nelze změřit silové spektrum nad každým vahadlem
- Měření pouze v horizontální poloze

Než byly jednotlivé varianty geometrie vahadel uvolněny na externí nezávislé měření v experimentálním zařízení umožňující změřit silové spektrum pod každým segmentem ložiska, tak byly nejprve všechny tyto konstrukce změřeny touto metodikou.

Jako materiál pro výrobu vahadel byla vybrána chrom-nikl-molybdenová zušlechťená ocel (34CrNiMo6), se kterou má GTW Bearings dobré zkušenosti v podobných aplikacích a tento materiál byl v úvodní rešerši zmíněn jako možná varianta (kapitola 2.3.7).

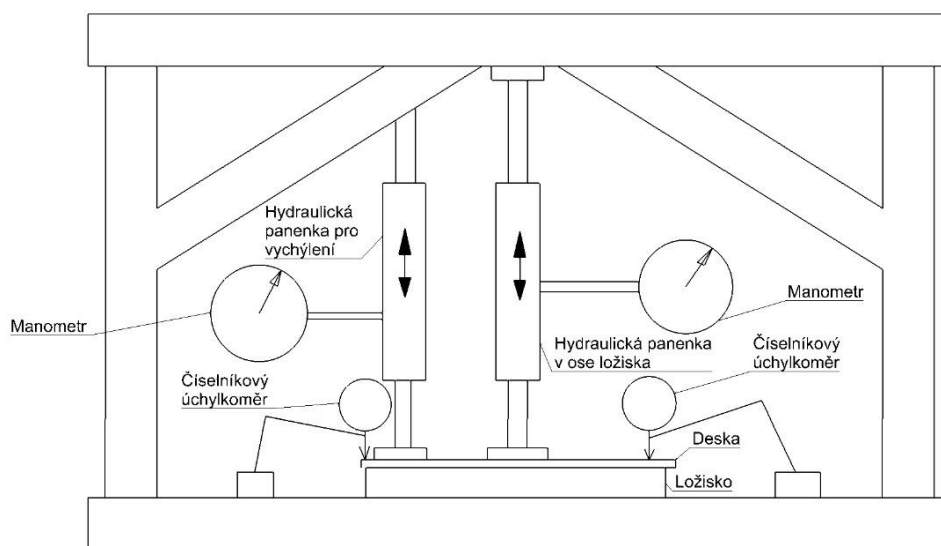
V příloze č. 6 jsou detailně popsána měření jednotlivých konstrukčních návrhů geometrií vahadel tak, jak šli chronologicky za sebou. Z těchto testů vzešly 3 finální sady (varianty) vahadel pro sestavení:

- „rádius na rádius“+ „rádius na rádius“,
- „rádius na rádius“ + „rádius na plochu“,
- „rádius na plochu“+ „rádius na plochu“.

Tyto tři varianty byly vybrány na měření na experimentální zařízení umožňující změřit silové spektrum pod každým segmentem ložiska. Toto zařízení bude detailně popsáno v následující kapitole.

7.2.2 Test s měřením silového spektra pod každým segmentem ložiska

Pro ověření funkčnosti ložiska a změření maximálního vychýlení ložiska s možností změřit silové spektrum pod každým segmentem ložiska bylo potřeba zkonstruovat a vyrobit měřicí stand. Princip měření maximálního vychýlení ložiska je znázorněn na obrázku č. 53.



Obr. 53: Zjednodušené schéma měření samo-vyrovňovacího ložiska na standu [33]

Na ložisko je položena broušená deska. Mezi touto deskou a horní deskou rámu je vloženo celkem 5 hydraulických válců. Jeden válec je v ose ložiska a další 4 jsou v každém kvadrantu ložiska. Válec v ose má za úkol ložisko „předepnout“ a tím je zde možnost ověřit funkčnost vyrovnávání ložiska pod zatížením. Na každý hydraulický okruh je připojen manometr, kde lze pro kontrolu odečíst velikost zatížení. Vychýlení je zde měřeno čtyřmi číselníkovými úchylkoměry. Velikost síly pod každým segmentem je odečtena pomocí tenzometrického čidla (tzv. „load cell“), které je umístěno mezi segmenty a broušenou deskou.

Stand disponuje možností měřit vychýlení ložiska jak v horizontální poloze, tak i ve vertikální poloze.

Vzhledem k množství čidel je na tomto standu možnost i změřit celkovou tuhost ložiskové sestavy.

Veškerý záznam z měření sil působících na tenzometrická čidla a tlaků v hydraulických okruzích je pak zpracován skrze sběrnici do měřicí ústředny a dále pak do PC, kde jsou všechny hodnoty zapsány pro budoucí zpracování.

Toto zařízení bylo postaveno ze zdrojů společností Doosan Škoda Power za účelem snahy pochopit kinematické procesy vahadel uvnitř ložiska při zatížení.

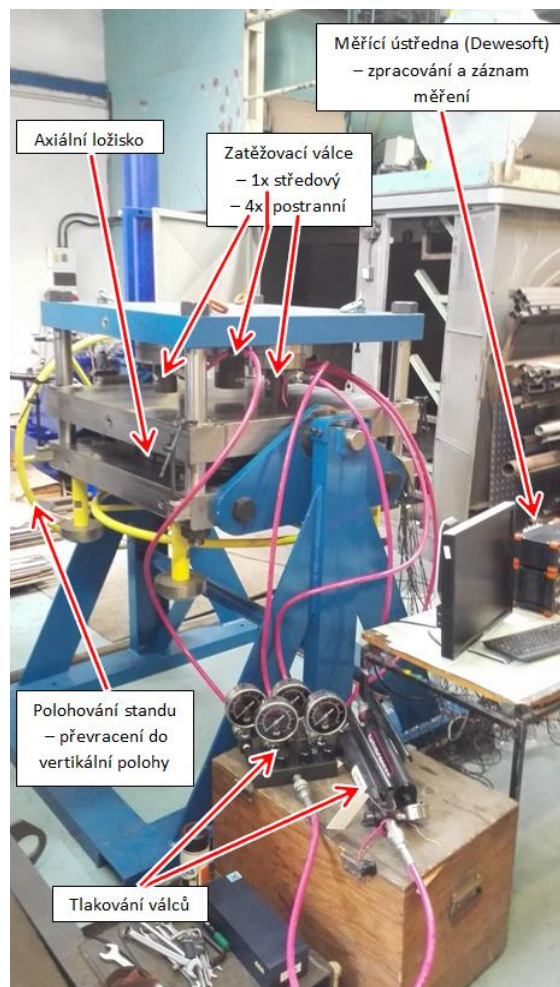
Tento způsob měření samo-vyrovnávacího ložiska spolu s konstrukcí standu je chráněn patentovou známkou.

Výhody tohoto způsobu měření:

- + Přesné.
- + Lze změřit zatěžující sílu.
- + Lze změřit silové spektrum nad každým vahadlem.
- + Měření v horizontální i vertikální poloze.
- + Možnost změřit celkovou tuhost sestavy.

Nevýhody tohoto způsobu měření:

- Náročné na obsluhu (měření se musí zúčastnit min. 3 proškolené osoby).
- Drahé.
- Časově náročné.



Obr. 54: Reálné měřicí zařízení vč. popisek [58]

Jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, všechny tři varianty vahadel, které byly změřeny v příloze 6 byly vybrány na změření v tomto měřicím zařízení, pro detailnější změření vychýlení a zjištění silového spektra pod každým segmentem ložiska => určení kinematické a statické charakteristiky jednotlivých variant.

Každá sestava byla změřena nejprve v horizontální a následně ve vertikální poloze. Možnost měřit ložisko i vertikální poloze je velice důležitá, protože se zde může projevovat tzv. „efekt sesypání vahadel“, kdy ložisko v horizontální poloze může pracovat bez problému, ale ve vertikální poloze, která je zároveň i jeho pracovní, již může být funkčnost vlivem tohoto efektu omezena.

Každá sestava byla změřena při konstantní síle 100 kN od středového válce a silách 20, 40 a 70 kN od postranních válců, které měli za úkol vychýlit horní broušenou desku. Při těchto zatíženích se měřila schopnost sestavy k vychýlení + schopnost sestavy k rozdělení sil pod jednotlivé segmenty.

V příloze č. 7 jsou detailně popsána měření jednotlivých typů geometrií vahadel jak v horizontální, tak i vertikální poloze. V následujících podkapitolách jsou popsány pouze některé fragmenty z měření.

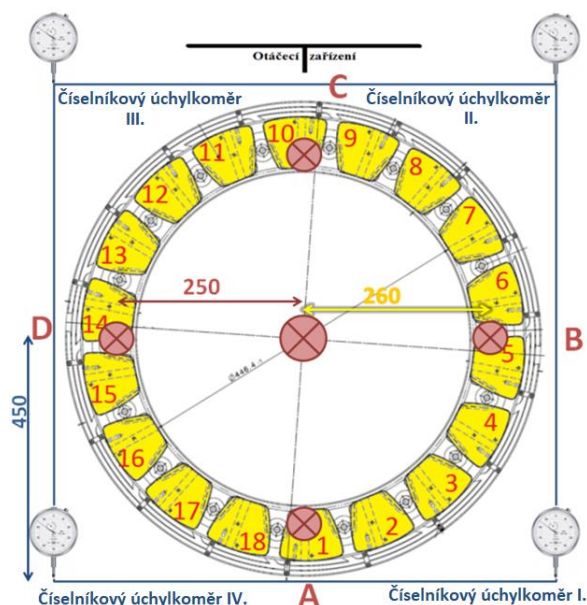
7.2.2.1 Měření v horizontální poloze

Zdroje: [58]

Pro přehlednější zanesení do tabulek a grafů byly sestavy pojmenovány takto:

- 1) Varianta 1 - „rádius na rádius“+ „rádius na rádius“.
- 2) Varianta 2 - „rádius na rádius“ + „rádius na plochu“.
- 3) Varianta 3 - „rádius na plochu“+ „rádius na plochu“.

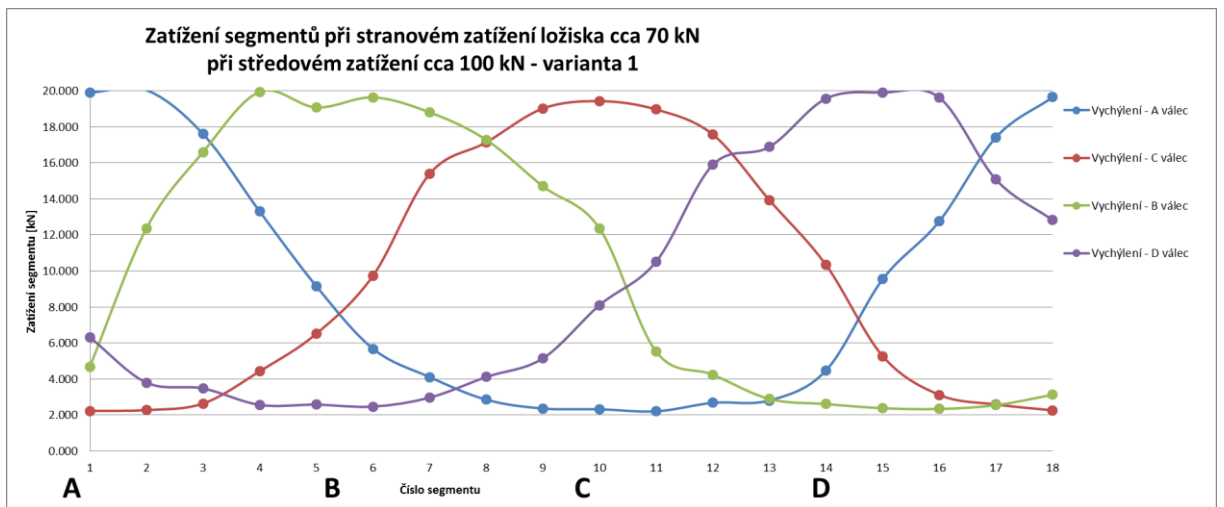
Vzhledem k tomu, že nelze broušenou desku vodorovně ustálit, bylo nejvhodnější změřit vychýlení v každém kvadrantu a hodnoty zprůměrovat. Takto bylo docíleno tzv. průměrné hodnoty vychýlení.



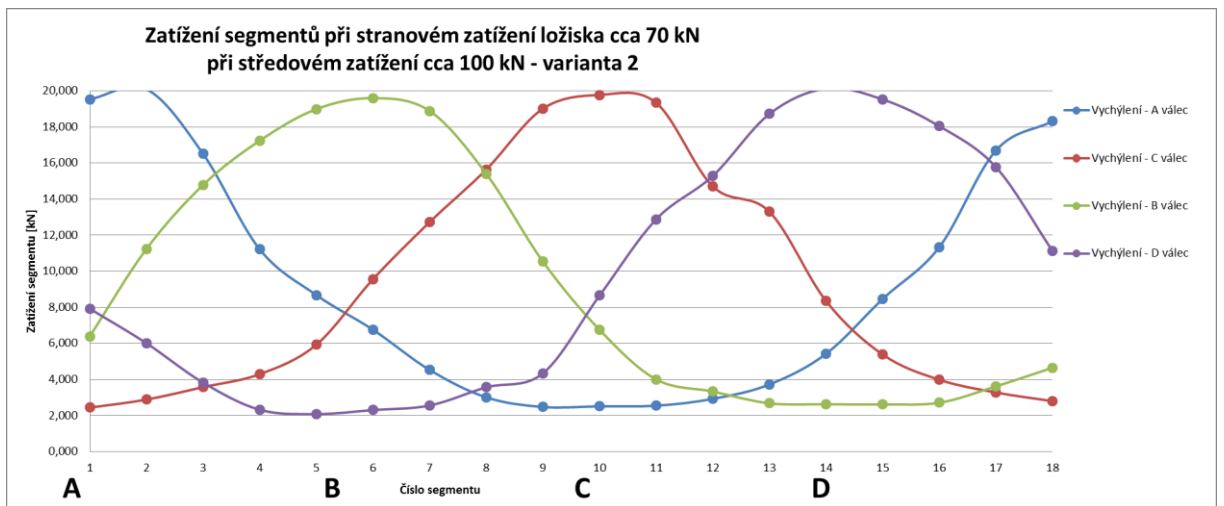
Obr. 55: Rozdělení na 4 kvadranty, vyznačení pozice válců a rozmístění úchylkoměrů

Tab. 2: Zatížení postranních válců 70kN [58]

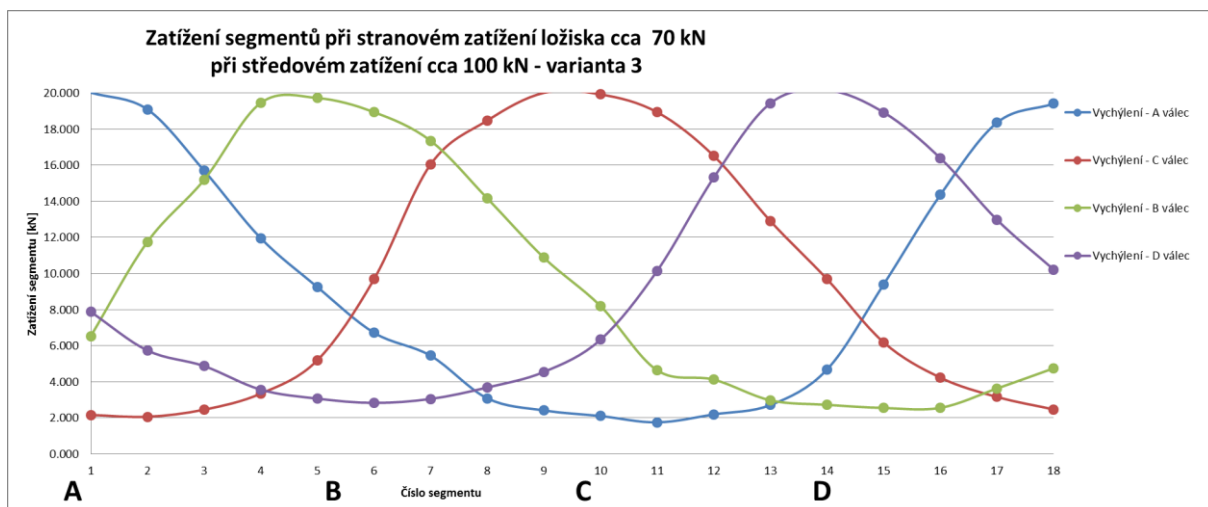
Kvadranty	Varianta 1 [°]	Varianta 2 [°]	Varianta 3 [°]
Kvadrant A	0,157	0,099	0,105
Kvadrant B	0,148	0,116	0,121
Kvadrant C	0,268	0,196	0,146
Kvadrant D	0,235	0,194	0,093
Průměrně:	0,202	0,151	0,116



Obr. 56: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]



Obr. 57: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]



Obr. 58: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]

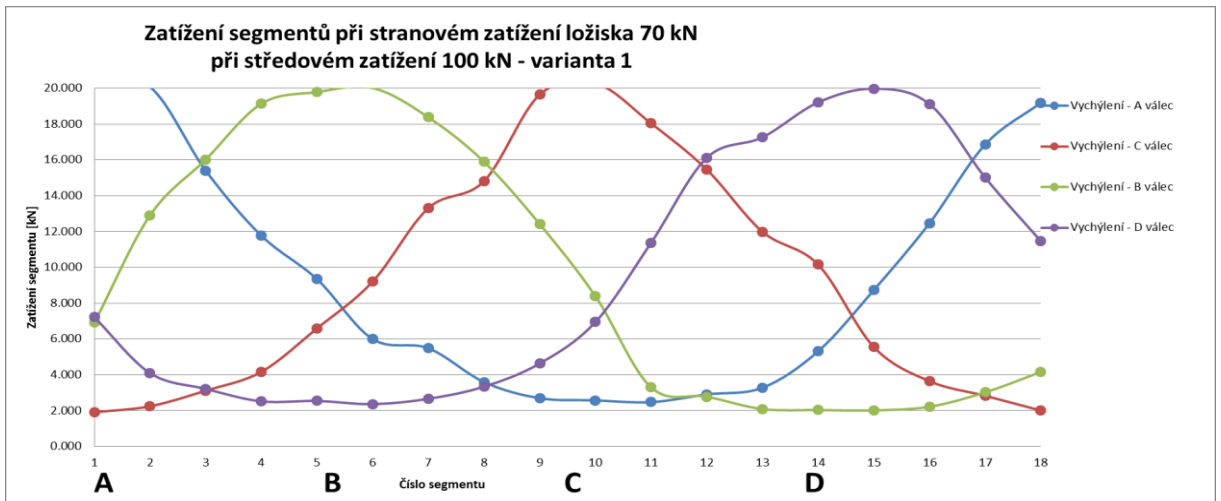
7.2.2.2 Měření ve vertikální poloze

Zdroje: [58]

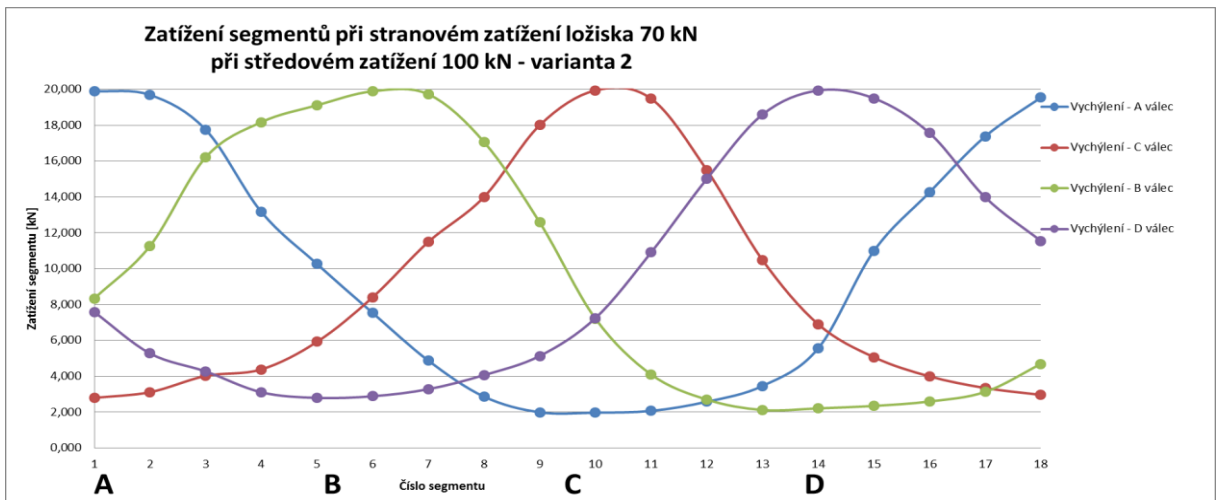
Po změření vše třech variant sestav vahadel v horizontální poloze následovalo měření ve vertikální poloze, které by mělo odhalit případnou omezenou funkčnost v důsledku efektu „sesypání vahadel“ vlivem gravitační síly.

Tab. 3: Zatížení postranních válců 70kN [58]

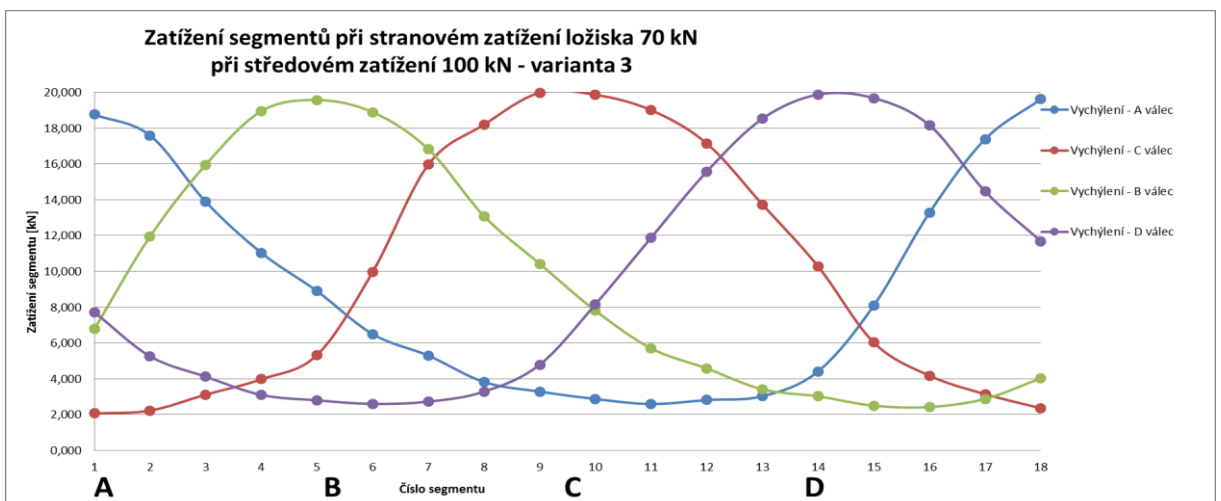
Kvadranty	Varianta 1 [°]	Varianta 2 [°]	Varianta 3 [°]
Kvadrant A	0.134	0.137	0.102
Kvadrant B	-0.215	-0.104	-0.101
Kvadrant C	-0.226	-0.158	-0.154
Kvadrant D	0.145	0.193	0.155
Průměrně:	0.180	0.148	0.128



Obr. 59: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]



Obr. 60: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]



Obr. 61: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze [58]

7.2.2.3 Diskuze nad výsledky

Z naměřených dat je patrné, že rozdíl mezi hodnotami v horizontální a vertikálních poloze je marginální. Fenomén sesypání vahadel v důsledku gravitace se nepotvrdil.

Z tabulek a grafů je dále patrné, že se stoupající silou vyvolanou od postranních válců stoupá i celkové (průměrné) vychýlení ložiska a vcelku logicky (z důvodu nemalých ztrát díky tření mezi vahadly) se zvyšuje rozdíl mezi nejvíce a nejméně zatíženým axiálním segmentem. Po proložení křivky mezi jednotlivými body zatížení je patrný „sinusový“ tvar, který jen potvrzuje teorii, která byla nastíněna v kapitole 2.3.7.

Pro celkové porovnání všech možných ložisek a sestav byl navržen vzorec, který zohledňuje velikost ložiska a na základě kterého se porovnává rozdíl síly na nejvíce a nejméně zatíženém segmentu, a to vše vztaženo na vychýlení ložiska o $0,1^\circ$ [MPa/mm]

Vzorec pro vyhodnocení:

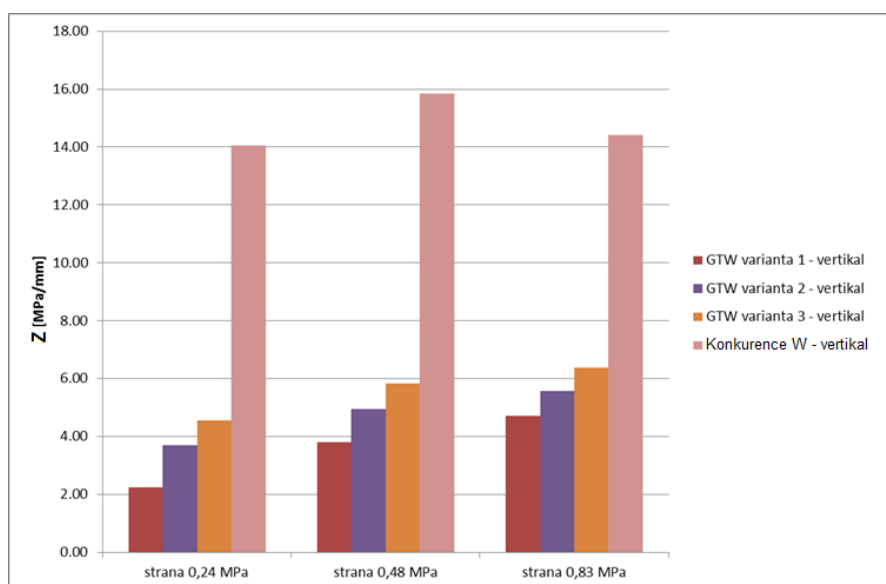
$$Z = \frac{P_{max} - P_{min}}{R \cdot \varphi} \left[\frac{MPa}{mm} \right], \text{ kde}$$

P_{max} Zatížení na nejvíce namáhaném segmentu v ložisku [MPa]

P_{min} Zatížení na nejméně namáhaném segmentu v ložisku [MPa]

R Vzdálenost polohy vahadla od středu [mm]

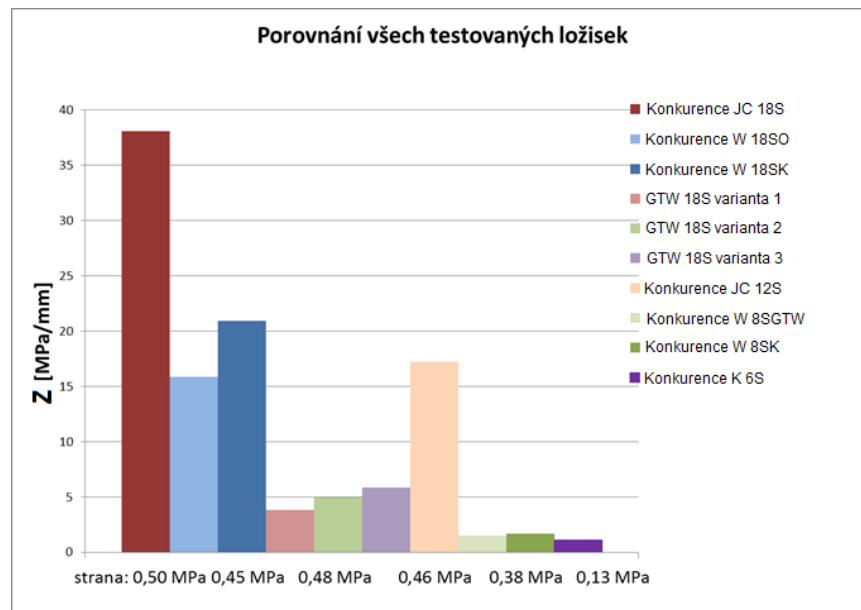
φ Úhel vychýlení ložiska [$^\circ$]



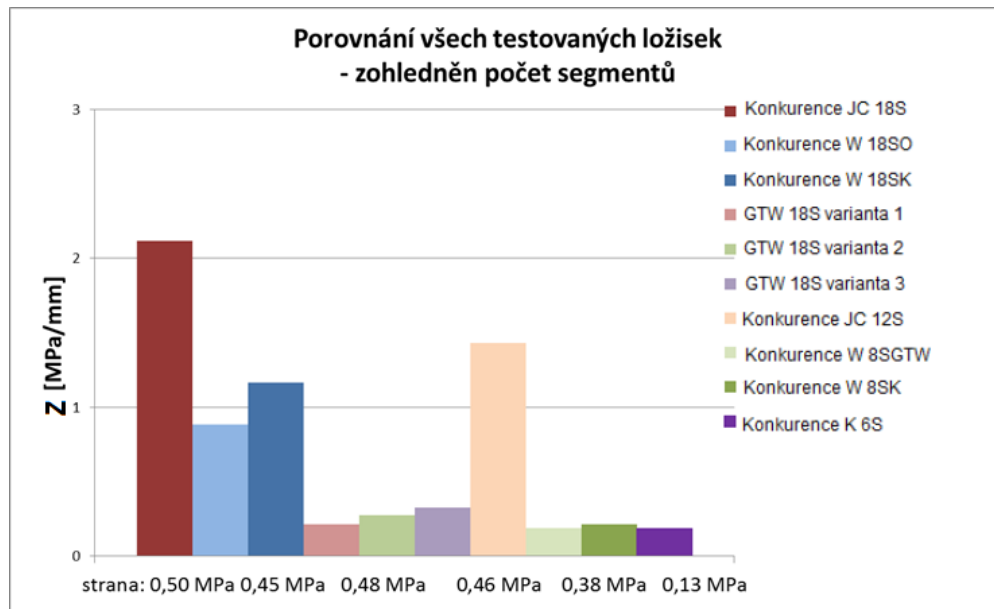
Obr. 62: Rozdíl síly na nejvíce a nejméně zatíženém segmentu vztažen na vychýlení ložiska o $0,1^\circ$ [MPa/mm] [58]

Z grafu (obr. 62) vyplývá, že varianta č. 1 je z hlediska kinematiky vychýlení nejvhodnější. Nicméně i nejhorší varianta, tj. varianta 3, byla mnohonásobně lepší než standardně dodávané ložisko konkurenčního amerického výrobce. Níže jsou porovnány varianty vahadel s dalšími

výrobci axiálních samo-vyrovňavacích ložisek s axiálními segmenty. Vzhledem k tomu, že varianta č. 3 je brána jako konzervativní z hlediska výskytu vysokých Hertzových tlaků, v dalším kroku (tj. experimentálním ověření tribologických vlastností vahadel) bylo nadále počítáno se všemi varianty vahadel. Tj. až na základě navazujících tribologických testech založených na komparačním měření bude vybrána optimální varianta vahadel.



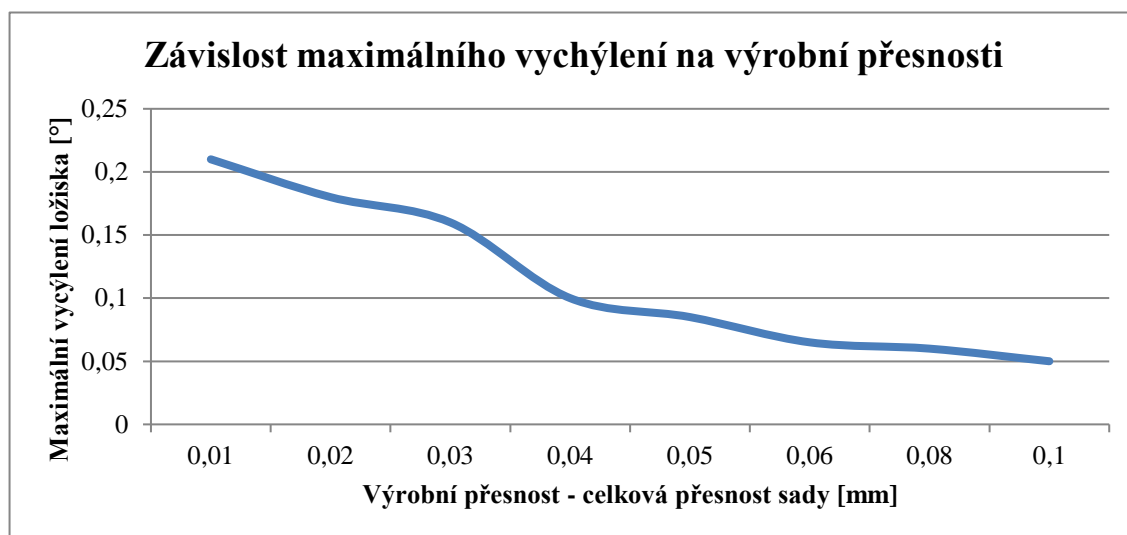
Obr. 63: Porovnání s konkurencí – rozdíl síly na nejvíc a nejmíň zatíženém segmentu vztážen na vychýlení ložiska o $0,1^\circ$ [MPa/mm] [58]



Obr. 64: Porovnání s konkurencí – rozdíl síly na nejvíc a nejmíň zatíženém segmentu vztážen na vychýlení ložiska o $0,1^\circ$ [MPa/mm] [58]

Výše uvedené grafy porovnávají jednotlivé mikrogeometrie vahadel mezi sebou, ale existuje ještě jeden parametr, který ovlivňuje maximální vychýlení ložiska, a to přesnost celé sestavy

vahadel. Byl proveden jednoduchý test, kdy do sestavy vahadel byl vložen záměrně nepřesně vyrobený kus vahadla. Na základě tohoto testu byl vypracován graf závislosti maximálního vychýlení na výrobní přesnosti (obr. 65). Z tohoto grafu vyplívá, že výroba vahadel by se měla pohybovat v absolutní přesnosti cca 0,03mm. V této oblasti se funkčnost ložiska láme a při horší přesnosti již ložisko nedokáže zachytit vychýlení $>0,1^\circ$.



Obr. 65: Závislost maximálního vychýlení na výrobní přesnosti

7.3 Experimentální ověření tribologických vlastností vahadel pomocí zjednodušených vzorků

Vzhledem k tomu, že všechny tři varianty sestavy vahadel, které byly součástí třetího (finálního) konstrukčního návrhu (Příloha 7), byly v předchozí kapitole shledány z hlediska funkčnosti geometrie (tj. bez ohledu na opotřebení, které může vzniknout při běhu stroje) jako vyhovující, bylo potřeba navrhnout takový tribologický test, který by ověřil funkčnost všech tří variant vahadel z hlediska tribologie (životnosti).

Cílem tohoto experimentálního ověření tedy bylo komparačně zjistit tribologické vlastnosti všech tří variant vahadel a najít tak optimální variantu, která bude vyhovující nejenom z hlediska geometrie (kinematiky => schopnosti vyrovnat vychýlení hřídele), ale i z hlediska míry opotřebení jednotlivých variant (životnosti).

7.3.1 Návrh vzorků pro experiment

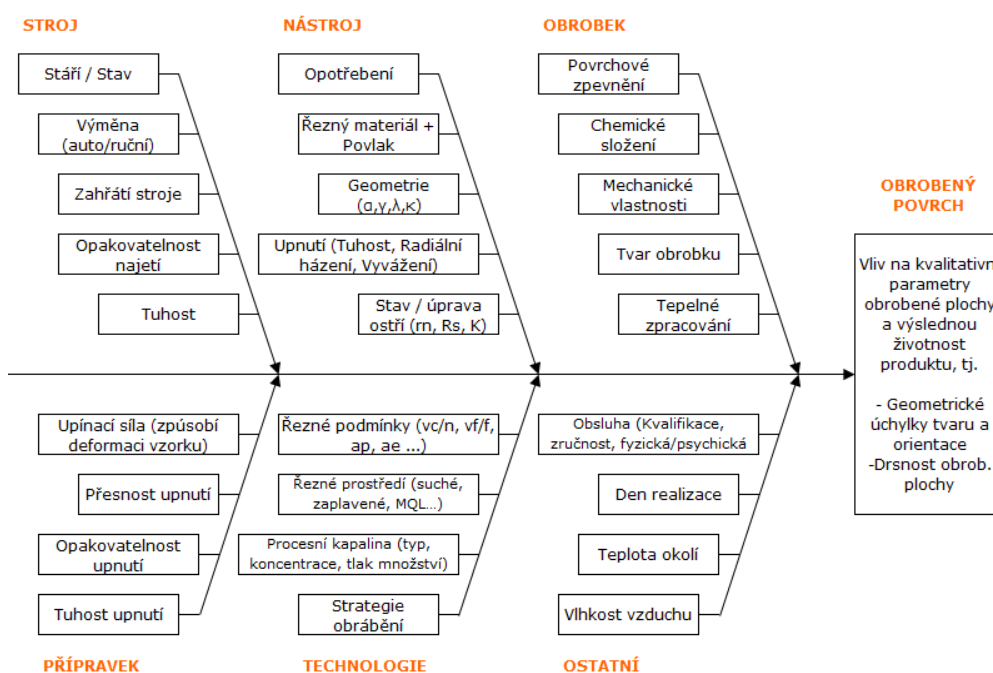
Při návrhu vzorků pro experiment bylo potřeba zohlednit mnoho kritérií a požadavků. Od toho se odvíjel i potřebný počet vzorků. K vypsání všech důležitých parametrů byl použit rozhodovací nástroj, tzv. Ishikawa diagram neboli diagram příčin a následků upravený pro rozhodovací proces výběru parametrů mající vliv na kvalitu obrobeneho povrchu s ohledem na jeho trvanlivost. Pokud bychom chtěli zohlednit všechna kritéria, která nám do této problematiky vstupují, počet vzorků pro experiment by téměř limitně blížil nekonečnu. Bylo proto potřeba určit, které parametry jsou důležité, které mohou opotřebení vahadel nejvíce ovlivnit, dají se snadno

přenést bez ovlivnění do jiného prostředí a zároveň nejsou zatíženy vysokou měrou statistické neurčitosti. Z toho důvodu byly vybrány parametry z oblasti „Obrobku“ a „Technologie“.

Z testu geometrie vahadel vyplynulo, že kontakt mezi vahadly může mít podobu kontaktu válce na válec, nebo kontaktu válce na plochu.

Vzhledem k několika formám (kombinacím) zatížení popsaných výše, je potřeba funkční povrch vahadel zpevnit. Mezi vhodné technologie povrchového zpevnění, které lze bez problému použít při výrobě vahadel, patří nitridace, nebo bezproudé niklování (viz kapitola 4).

Vyrábět kompletně celá vahadla pro testy opotřebení funkčních ploch je z ekonomického hlediska zbytečné, a proto bylo přistoupeno na zjednodušení ve formě válečku o rozměrech válcové plochy vahadla a ve formě destičky jako nahrazení plochy na vahadle.



Obr. 66: Diagram příčin a následků (Ishikawa diagram) zohledněn pro kvalitu obrobkové plochy [autor]

Vybrané parametry mající největší vliv na kvalitu povrchu s ohledem na snadnou přenositelnost do jiného prostředí:

- a) Oblast „Obrobek“:
 - i. Tvar obrobku.
 - ii. Materiál (chemické složení vč. tepelného zpracování => mech. vlastnosti).
 - iii. Povrchové pevnění.
- b) Oblast „Technologie“:
 - i. Řezné podmínky.



Obr. 67: Testovaný váleček

Oblast „Obrobek“

Tvar obrobku

Pokud bychom zjednodušili geometrii všech vahadel na jednoduchá geometrická tělesa, vyšli by nám tyto dva geometrické prvky: *válec* a *plocha*.

Varianta 1 - „rádius na rádius“+ „rádius na rádius“, neboli „válec na válec“⁷ + „válec na válec“⁷
=> tzn. „bodový kontakt“ + „bodový kontakt“

Varianta 2 - „rádius na rádius“ + „rádius na plochu“, neboli „válec na válec“⁷ + „válec na plochu“ => „bodový kontakt“ + „čárový kontakt“

Varianta 3 - „rádius na plochu“+ „rádius na plochu“ neboli „válec na plochu“ + „válec na plochu“ => „čárový kontakt“ + „čárový kontakt“

V rámci experimentu tak mají vzorky tvar válečku o průměru 12 mm a délce 25 mm, nebo destičky o rozměrech 25x25, což odpovídá velikosti u referenčního ložiska s 18-ti segmenty.

Materiál

Pro účel experimentálního ověření byla ponechána chrom-nikl-molybdenová zušlechťená ocel (34CrNiMo6). Praktické použití chrom-nikl-molybdenových, je podloženo dlouhodobou provozní spolehlivostí dodávaných výrobků. Jiný materiál prozatím nebyl uvažován. Lze tedy říci, že výběr tohoto materiálu je v souladu s technologičností konstrukce, kdy se nepředepisuje zbytečně nový (nevyzkoušený) materiál.

Případné povrchové pevnění

Dále pak existují technologie povrchového zpevnění, které zvýší tribologické vlastnosti daného výrobku. V předchozích kapitolách byly vyjmenovány a zvoleny nejvhodnější technologie. Tj.:

- Nitridace
- Bezproude niklování

Tyto technologie lze bez problému použít na tvarově složitý výrobek, jakým vahadlo bezpochyby je. A také lze tyto technologie použít jako finální úpravu po obrobení načisto bez dodatečného broušení, nebo jiné technologie dokončovacího obrábění.

Oblast „Technologie“

Řezné podmínky

Vhodně zvolenými podmínkami obrábění výsledného povrchu lze ovlivnit zejména drsnost (nosný profil). Vzhledem k tomu, že vybraný tvar vzorků je v podobě válce, byla jako technologie výroby vzorků vybrána technologie soustružením. Parametr, který nejvíce ovlivní drsnost při soustružení je pak bezesporu *posuv*.

Ostatní parametry jako řezná rychlost, hloubka řezu atd. samozřejmě kvalitu výsledného povrchu také nemálo ovlivňují, ale jak již bylo napsáno výše, pokud bychom chtěli dát mezi proměnné všechny parametry řezných podmínek, počet vzorku pro experiment by se limitně blížil nekonečnu a vypovídající hodnota experimentu by byla podobná.

⁷ Válce jsou v tomto případě k sobě osově navzájem mimoběžné

Jako mezioperaci mezi případným povrchovým zpevněním lze také použít *omílání*, které lze použít před nitridací a před niklováním.

V rámci tohoto experimentu jde primárně o vytvoření (nasimulování) několika desítek různých povrchů a nalezení takového povrchu, který má optimální tribologické vlastnosti za účelem použití v samo-vyrovnávacím axiálním ložisku.

Počet vzorků pro experiment

S ohledem na výše zmíněné nebylo vhodné zvolit centrální kompozitní plán. Centrální kompozitní plán by vyžadoval velké množství vzorků, což znamenalo velkou časovou náročnost experimentu. I z tohoto důvodu byl pro experiment navržen „uživatelský plán“ (*custom design*). I v uživatelském plánu je zachována ortogonalita, rotačnost atd. Dle tohoto uživatelského plánu byla naplánována i výroba válečků o těchto parametrech:

Kontrolované faktory:

- Drsnost povrchu (daná posuvem nástroje) => X_1
 - Typ faktoru: Numerický
 - Hodnoty f1-f5 kódově: -1; -0,5; 0; 0,5; 1
- Způsob opracování => X_2
 - Typ faktoru: Kategorický
 - Hodnoty: Soustružení vs. Soustružení + Omílání

Konstantní faktory

- Podmínky obrábění:
 - Řezná rychlost: 120 m/min
 - $a_p = 0,5$ mm
 - Chladicí kapalina: Blasocut BC35 Kombi - 5 % + 95 % voda
- VBD:
 - Hrubování ISCAR CCMT 09T304-SM
 - Na hotovo ISCAR DCMT 11T304-F3P => vždy lehce opotřebovaná (tzv. „zajetá“) => $VB = 30-40$ μ m
- Stroj (EMCO MAXXTURN 25 - viz příloha č. 11):
- Omílání (viz kapitola 7.3.3)
- Zatěžovací stavy => viz následující kapitoly
- Materiál válečků a destiček

Bloky experimentu:

1. Zatížení Válec / Válec (bez povrchového zpevnění)
2. Zatížení Válec / Válec (nitridace)
3. Zatížení Válec / Válec (bezproudé niklování)
4. Zatížení Válec / Plochu (bez povrchového zpevnění)
5. Zatížení Válec / Plochu (nitridace)
6. Zatížení Válec / Plochu (bezproudé niklování)

Odezva (výsledek): Životnost (nejmenší opotřebení)

Přiřazení hodnot posuvů/otáčky pro definování drsnosti po soustružení:

- Hodnota -1 => $f_1=0,08$ => $\sim Ra\ 0,6$
- Hodnota -0,5 => $f_2=0,12$ => $\sim Ra\ 1$
- Hodnota 0 => $f_3=0,16$ => $\sim Ra\ 2$
- Hodnota 0,5 => $f_4=0,2$ => $\sim Ra\ 3$
- Hodnota 1 => $f_5=0,24$ => $\sim Ra\ 4,5$

Tab. 4: Pořadí testů pin-on-disk pro každý blok

Pořadí testů	X_1 (f)	X_2 (Způsob opracování)
1	0	Soustružení + Omílání
2	1	Soustružení + Omílání
3	-0,5	Soustružení
4	0,5	Soustružení + Omílání
5	-1	Soustružení
6	0,5	Soustružení
7	1	Soustružení
8	0	Soustružení
9	0	Soustružení + Omílání
10	-1	Soustružení + Omílání
11	0	Soustružení
12	-0,5	Soustružení + Omílání

- ⇒ Pro 6 bloků je to celkem 72 testů.
- ⇒ Celkový počet potřebných válečků je 54ks (pro způsob opracování „Soustružení“ vč. třech možností povrchového zpevnění) + 54ks (pro způsob opracování „Soustružení + Omílání“ vč. třech možností povrchového zpevnění).

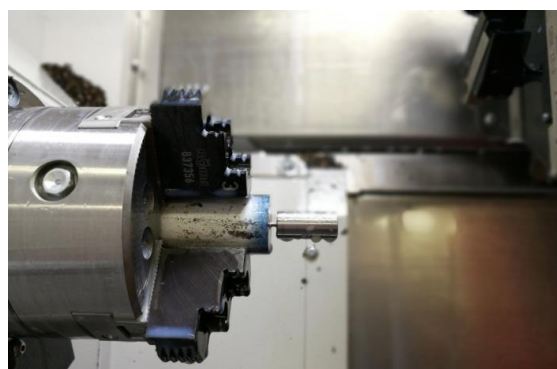
Vzhledem k redukci počtu experimentů byly desky pouze broušené a popřípadě povrchově zpevněné. Opotřebení se pak sledovalo vždy na válečku. Detailní tabulka ilustrující plán experimentu v Příloze 14.

7.3.2 Výroba testovacích vzorků

Kompletní výroba vzorků pro experiment probíhala v laboratořích KTO, popřípadě RTI. Jako stroj byl použito obráběcí centrum EMCO MAXXTURN 25 – viz příloha č. 11.

Jako polotovar byla zvolena tyč o průměru 25 mm z chrom-nikl-molybdenové zušlechťené oceli (34CrNiMo6). Jedná se o komplexně legovanou ocel, která je využívána pro výrobu vysoce dynamicky namáhaných součástí.

Řezné podmínky vč. nástroje jsou zmíněny výše v kapitole 7.3.1. Posuvy na otáčky byly navrženy na základě obrobení prvních (zkušebních) válečků a proměření jejich drsností pomocí dílenského drsnoměru.



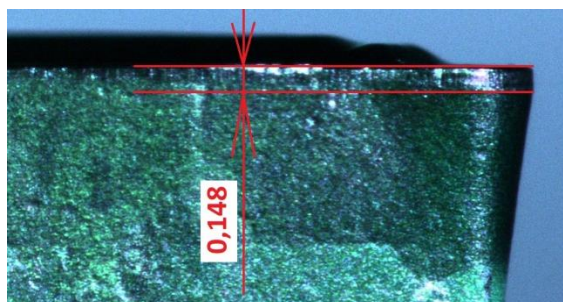
Obr. 68: Obrobený váleček před ulomením

Aby bylo docíleno co možná nejvíce konstantních povrchových parametrů, byla pro výrobu válečků vždy použita zaběhnutá VBD (VB = 30–40 μm a limitní opotřebení VBD bylo stanoveno na $\text{VB}_{\text{krit}} = 150 \mu\text{m}$. Opotřebení VBD bylo měřeno na dílenském mikroskopu – viz příloha č. 9. Kontrola opotřebení VBD byla prováděna po obrobení každého 9. kusu anebo když po povrch po obrobení nedosahoval požadovaných parametrů.

Válečky určené pro omílání byly vyrobeny delší o 15 mm z důvodu nutnosti uchycení v přípravku omítacího zařízení.

Strategie soustružení byla následující:

- Hrubování na $D=13 \text{ mm}$
- Obrobení načisto na $D=12 \text{ mm}$
- Upíchnutí na $L=25 \text{ mm}$, nebo $L=40 \text{ mm}$



Obr. 69: Hraniční opotřebení VBD

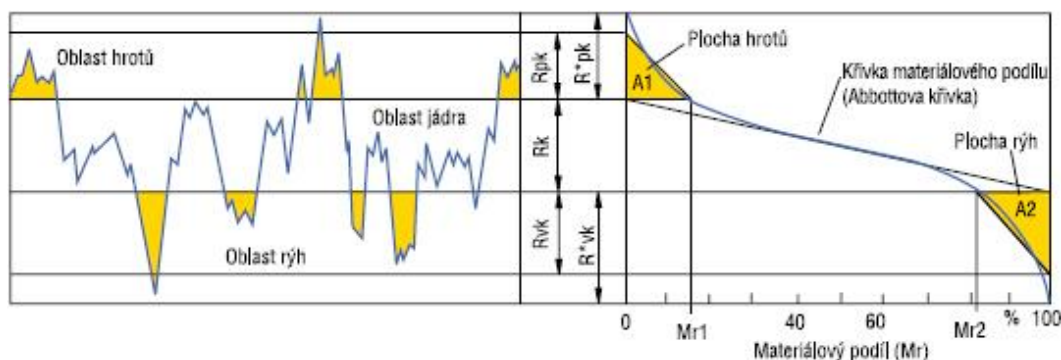
7.3.3 Měření povrchu testovacích vzorků

Ihned po obrobení byl každý váleček změřen dílenským drsnoměrem Mahr MarSurf M300 (Příloha 8). Následně byl povrch u vybraných válečků změřen i pomocí optického 3D měřicího zařízení Alicona (porovnání v příloze 15).

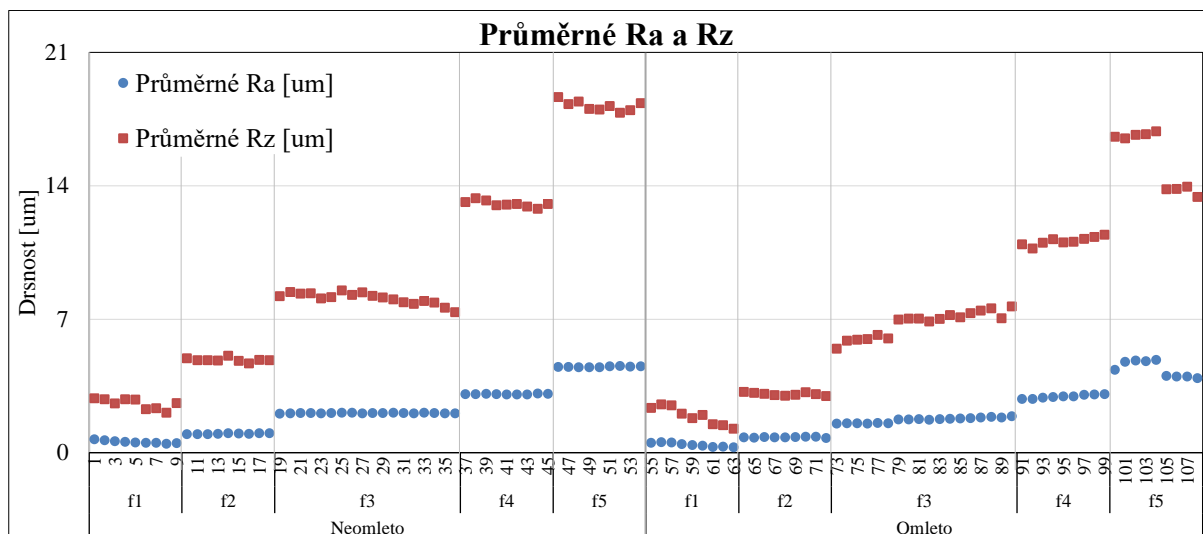
Byly odměřeny tyto parametry: R_a [μm], R_z [μm], R_{pk} [μm], R_k [μm], R_{vk} [μm], Mr_1 [%], Mr_2 [%], A_1 [$\mu\text{m}/\text{mm}$], A_2 [$\mu\text{m}/\text{mm}$]. Každý parametr byl odměřen na třech místech a výsledná hodnota byla zprůměrována.

Pro omílání vzorků č. 55-108 byl použit stroj OTEC DF3 (viz příloha 13). Po několika testech byly zvoleny tyto parametry omílání:

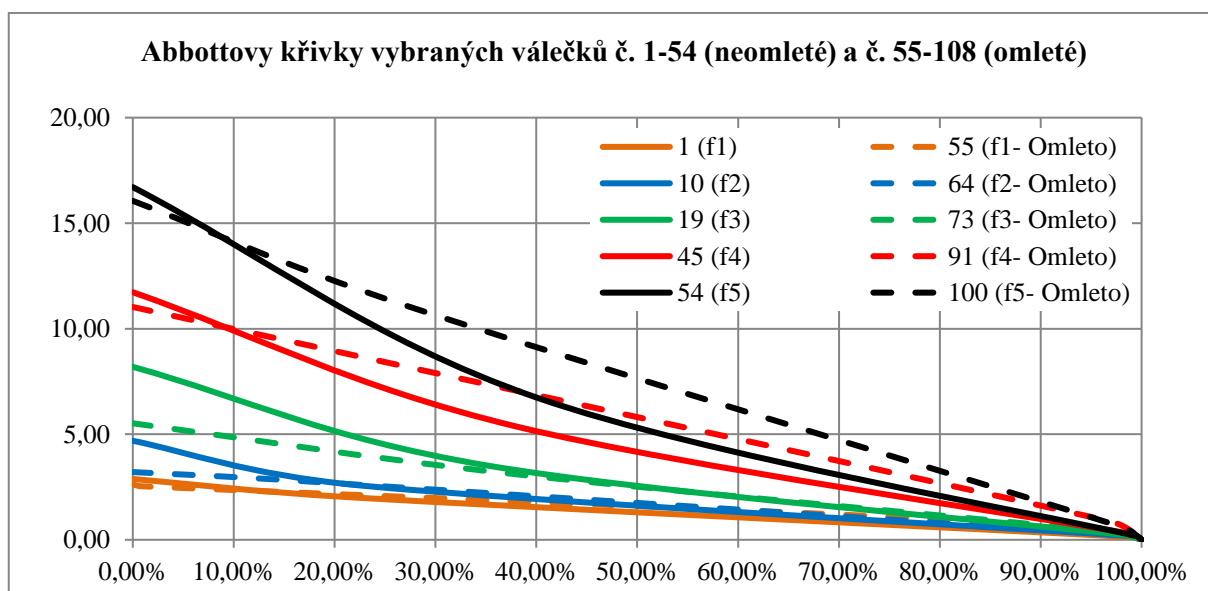
Typ omílání:	Vlečné
Otáčky rotor:	40 min^{-1}
Otáčky držák:	90 min^{-1}
Hloubka ponoru:	420 mm
Zdvih:	Nebyl použit
Médium:	H4/400
Čas omílání CW:	3 min
Čas omílání CCW:	3 min



Obr. 70: Drsnost povrchu dle DIN EN ISO 13565 [59]



Obr. 71: Graf drsností válečků [autor]



Obr. 72: Abbottovy křivky vybraných válečků [autor]

Diskuze nad výsledky

Z výše uvedených grafů je patrné, že se podařilo vyrobit válečky lišící se od sebe „skokově“ svojí drsností, což byl i cíl. Spolu s omíláním bylo ale docíleno širokého spektra drsností při zachování relativně málo proměnných, které do experimentu vstupovali. Toto spektrum je nejlépe vidět v příloze 15 (obr. P-44). To je důležité, protože čím víc proměnných by do experimentu vstoupilo, tím by se experiment nejen prodražoval ale i neúměrně prodlužoval.

Dále je z grafů patrné, že drsnost povrchu válečků po omílání klesla. U drsností, které byly již zpočátku nízké, tento pokles nebyl tak markantní, jako u válečků, které měli drsnost zpočátku větší. Jak je patrné z Abbotových křivek došlo zejména ke sražení „vrcholků“, ale profil

drsnosti byl víceméně zachován. Došlo tedy vlastně k určitému „zaběhnutí“ vzorku před následným měřením tribologických vlastností, což byl také účel použití právě technologie omílání.

U vybraných válečků byl povrch změřen i pomocí optického 3D měřicího zařízení Alicona. Toto porovnání je taktéž v příloze 15. Některé hodnoty drsností změřených dílenským drsnoměrem a Aliconou se lišily v řádu procent, ale některé i výrazněji. Tento rozdíl je dán jak chybou měření, ale také i například „čistotou“ skenu, která nemusela být v některých případech 100 %.

7.3.4 Metalografická analýza zkušebních vzorků

Cílem bylo zhodnotit stav mikrostruktury vzorků, které jsou určeny pro testování. Vzorky byly vyrobeny z oceli 34CrNiMo6. Jedná se o komplexně legovanou ocel, která je využívána pro výrobu vysoce dynamicky namáhaných součástí. Tato ocel byla následně zušlechtěna dle TZ doporučeného pro tento materiál. Kalení probíhalo v oleji z teploty 830-860 °C a při popouštění se teploty pohybovaly v rozmezí 630-660 °C. Tvrdost základního materiálu byla naměřena 330 HB.

Zkoumané vzorky byly zkoušeny ve formě válečků, tak jak byly dále použity i v navazujícím experimentu, který napodobuje reálné podmínky použití, kdy hrozí riziko přílišného opotřebení vahadel vyrobených z tohoto materiálu.

Válečky byly zkoušeny o rozměru: průměr 12 mm a délka 25 mm. Vzorky byly dále rozřezány na metalografické pile podélně i příčně – kolmo na uvažovaný směr poškození. Dále byly zality do preparační hmoty a metalograficky vybroušeny a vyleštěny. Metalografické výbrusy byly poté naleptány pomocí leptadla Nital 3 %, a poté zdokumentovány pomocí metalografického mikroskopu.

Pro metalografické výbrusy bylo vybráno pouze několik vzorků:

- Bez povrchové úpravy.
 - Drsnost „f1“ => ~Ra 0,6
- Niklované bezproudým způsobem.
 - Drsnost „f1“ => ~Ra 0,6.
 - Drsnost „f5“ => ~Ra 4,5.
- Nitridované:
 - a) Externí dodavatel (drsnost „f1“=> ~Ra 0,6)
 - b) KMM, ZČU Plzeň (drsnost „f1“=> ~Ra 0,6)

Tab. 5: Chemické složení vzorků:

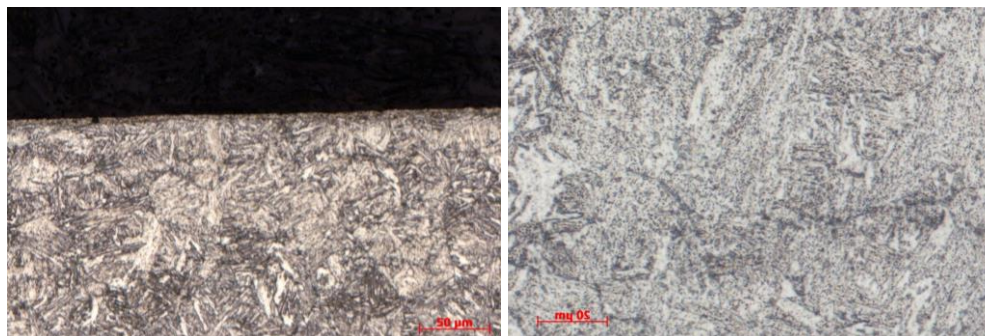
Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
[%]	0,34	0,793	0,282	0,0196	0,0052	1,72	1,55	0,221	0,0092	0,193	0,0194

Přesto že vybraná ocel není považována za nitridační, bývá v praxi často nitridována. Na vzorcích s povrchovou úpravou (niklovaný, nitridovaný povrch) byla provedena zkouška mikrotvrdosti HV 0,05 (resp. HV 0,025), aby bylo stanoveno, do jaké hloubky lze počítat s vyšší

odolností materiálu. Z hlediska vyhodnocení by bylo příhodnější použití většího zatížení, cca HV 0,5, ale vzhledem k velmi tenké vrstvě a blízkosti kraje by byl výsledek zatížen velkou chybou měření.

Vzorky bez povrchové úpravy

Tyto vzorky byly pouze zušlechťeny dle TZ doporučeného pro tento materiál – ocel 34CrNiMo6.

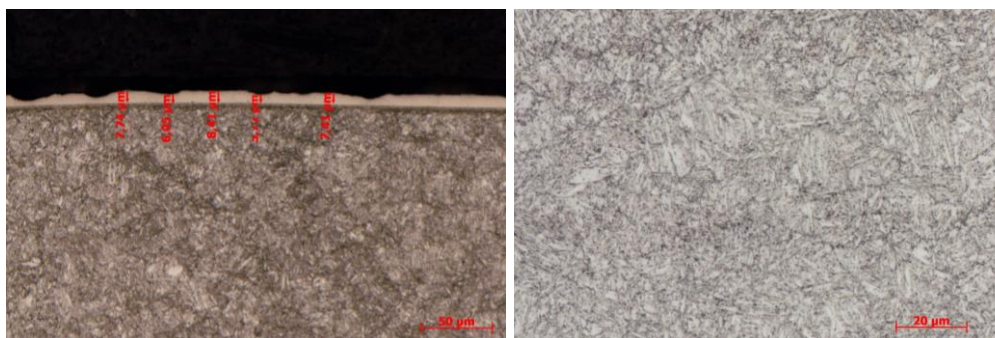


Obr. 73: Vzorek bez povrchové úpravy okraj – zvětšeno 100x (vlevo); detail – zvětšeno 500x (vpravo)

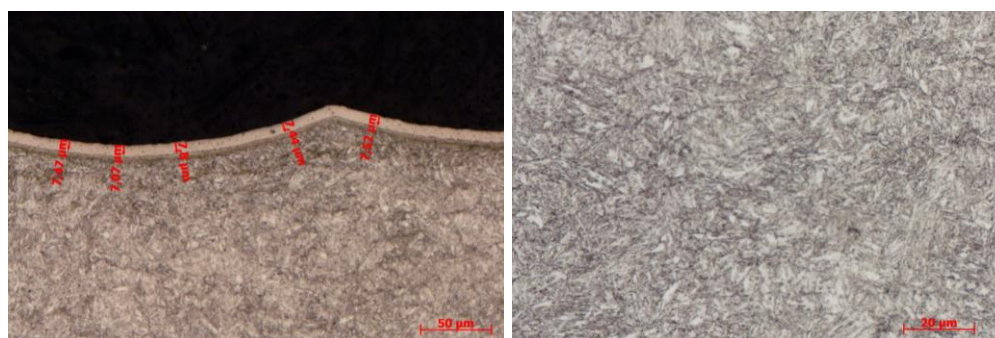
Dle obr. č. 73 je stav struktury shodný na povrchu i v jádře materiálu.

Vzorky s povlakem bezproudového niklu

Povrch niklovaných vzorků k analýze byl dodán hrubě (~Ra 4,5) a jemně (~Ra 0,6) soustružený, což bude v dalším popisu vyznačeno.



Obr. 74: Vzorek niklovaný, jemně soustružený povrch s vyznačenou tloušťkou vrstvy – zvětšeno 200x (vlevo); střed vzorku – zvětšeno 500x (vpravo)



Obr. 75: Vzorek niklovaný, hrubě soustružený s vyznačenou tloušťkou vrstvy – zvětšeno 200x (vlevo); střed vzorku – zvětšeno 500x (vpravo)

Tab. 6: Mikrotvrdość jemně soustružených vzorků deponovaných Ni povlakem HV 0,025

Jemně soustruženo			
Příčně		Podélně	
Vrstva [HV 0,025]	Střed [HV 0,025]	Vrstva [HV 0,025]	Střed [HV 0,025]
650	425	687	414
620	382	662	342
600	388	673	407
605	394	656	388
630	370	679	375
Průměr	621	671	386
Odchylka	18	11	26

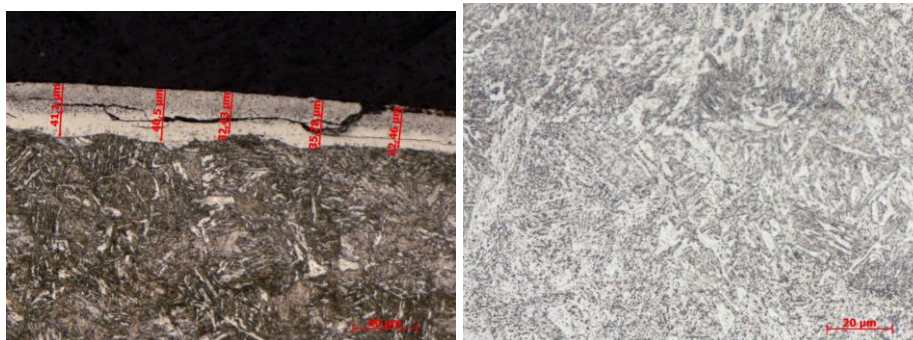
Tab. 7: Mikrotvrdość hrubě soustružených vzorků deponovaných Ni povlakem HV 0,025

Hrubě soustruženo			
Příčně		Podélně	
Vrstva [HV 0,025]	Střed [HV 0,025]	Vrstva [HV 0,025]	Střed [HV 0,025]
241	388	388	370
206	396	391	348
203	388	484	373
220	370	626	394
257	364	364	388
Průměr	225	451	375
Odchylka	23	108	17

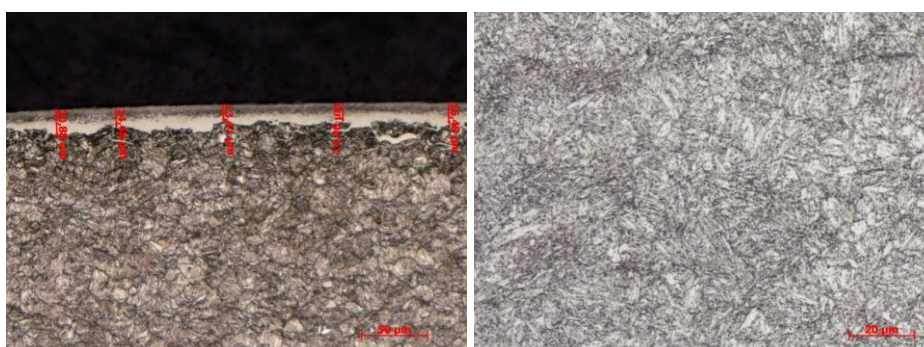
Válečky opatřené vrstvou bezproudého Ni mají shodnou tloušťku vrstvy cca 7-8 μm . Vrstva kopíruje reliéf povrchu, je konzistentní, a bez patrných defektů. Základní materiál odpovídá hodnotám tvrdosti požadovaným v materiálových tabulkách. Hodnoty mikrotvrdości povrchu jsou nižší, než by se očekávalo.

Vzorky s nitrídaným povrchem

Než byly testovací vzorky opatřeny nitrídaní vrstvou, tak proběhl určitý výběr dodavatele, který měl nitrídací zhotovit. K analýze byly použity dva různé zdroje nitrídací válečků. Jeden zdroj byl externí dodavatel, druhým byla interní příprava v zařízení na KMM (ZČU).

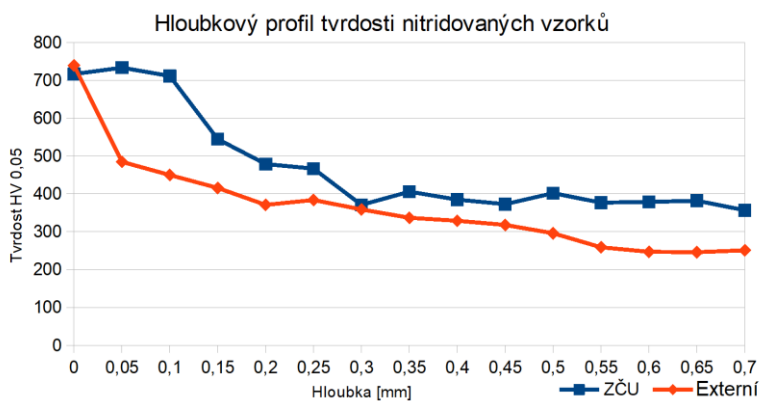


Obr. 76: Vzorek nitridovaný – externí dodavatel, tloušťka bílé vrstvy zvětšeno 200x (vlevo); střed vzorku zvětšeno 500x (vpravo)



Obr. 77: Vzorek nitridovaný – KMM (ZČU), tloušťka bílé vrstvy zvětšeno 200x (vlevo); střed vzorku zvětšeno 500x (vpravo)

Nitridované vzorky dokazují odlišný postup nitridace i mechanismus poškození povrchu. Vzorek zpracovaný na KMM měl tloušťku bílé vrstvy cca 15-20 μm . Tato bílá vrstva byla kompaktní a nevykazovala nekonzistenci jako vrstva zhotovená u externího dodavatele. Tvrdost do hloubky i v jádře byla vyšší než u nitridovaných vzorků zhotovených u externího dodavatele. Tloušťka bílé vrstvy v tomto případě byla 30-40 μm a docházelo v ní k delaminaci.



Obr. 78: Hlubkový profil tvrdosti nitridovaných vzorků

Tab. 8: Tabulka mikrotvrdosti středů vzorků neupravovaného a nitridovaných

Mikrotvrdost střed		
	Externí dodavatel [HV 0,05]	KMM (ZČU) [HV 0,05]
	247	363
	257	386
	262	434
	227	369
	251	424
Průměr	249	395
Odchylka	13	32

Diskuze nad výsledky

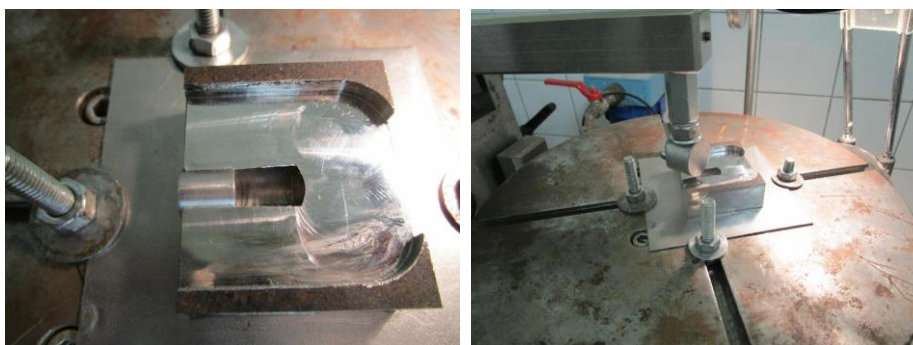
Z tabulek č. 6 a 7 je čitelné, že povrch s Ni povlakem je u jemně soustruženého povrchu tvrdší. U hrubě soustruženého povrchu (a hlavně u příčného výbrusu) je tvrdost menší. To ale může být ovlivněno tím, že při větší drsnosti je měření ovlivněno tím, že v měřeném místě není vrstva kompaktní, ale je pod ní "měkčí" podklad.

U nitridovaného povrchu z grafu (obr. 78) vyplývá, že nitridovaná vrstva má vyšší tvrdost HV0,05 (přes 700) než střed. Přejít na tvrdost jádra byla u externího dodavatele velmi rychlá. Hloubka nitridované vrstvy u vzorků zhotovených KMM byla cca 0,2mm. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem byl pro zhotovení nitridační vrstvy vybrán jako dodavatel KMM.

7.3.5 Rozřazovací test na tribometru

Vzhledem k vysokému množství testovaných vzorků (viz. příloha 14) bylo přistoupeno k rozřazovacímu testu na tribometru pomocí metodiky podobné metodice PIN-ON-DISC.

Pro prvotní základní testování a určení parametrů, bylo použito testovací zařízení – tribometr „PIN-on-DISC“ zkonstruovaný a vyrobený na katedře KMM, který byl upraven pomocí nově vyrobených držáků pro možnost uchycení v daném testovacím přístroji.



Obr. 79: Výroba a ustavení válečků v držáku



Obr. 80: Testování válečků na tribometru (vlevo); detail opotřebení (vpravo)

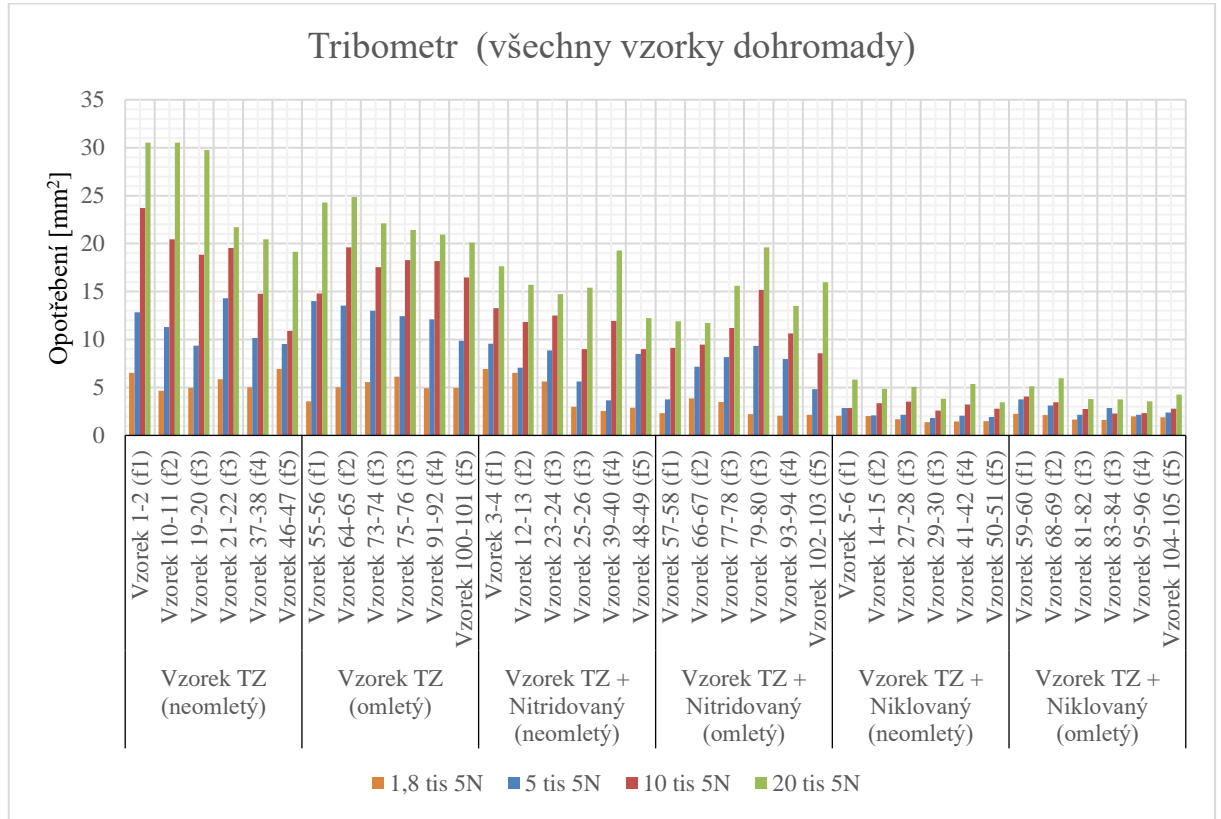
Princip testování byl následující. V přístroji byly upevněny 2 válečky. Jeden vzorek byl připevněn napevno k držáku ramene tribometru a druhý do držáku v pohyblivé části. Provozní zatížení bylo provedeno pomocí závaží (využití gravitační síly). Pohybem vzorků po sobě se simulovalo kontaktní namáhání. Po dosažení předepsaného počtu cyklů vzájemného kontaktu byl test přerušen a oba vzorky pootočený k testování jiné kontaktní plochy nebo k výměně testovaných vzorků.

Tak aby bylo možné sledovat vývoj poškození, bylo zvoleno postupné zvětšování zatížení v řadě:

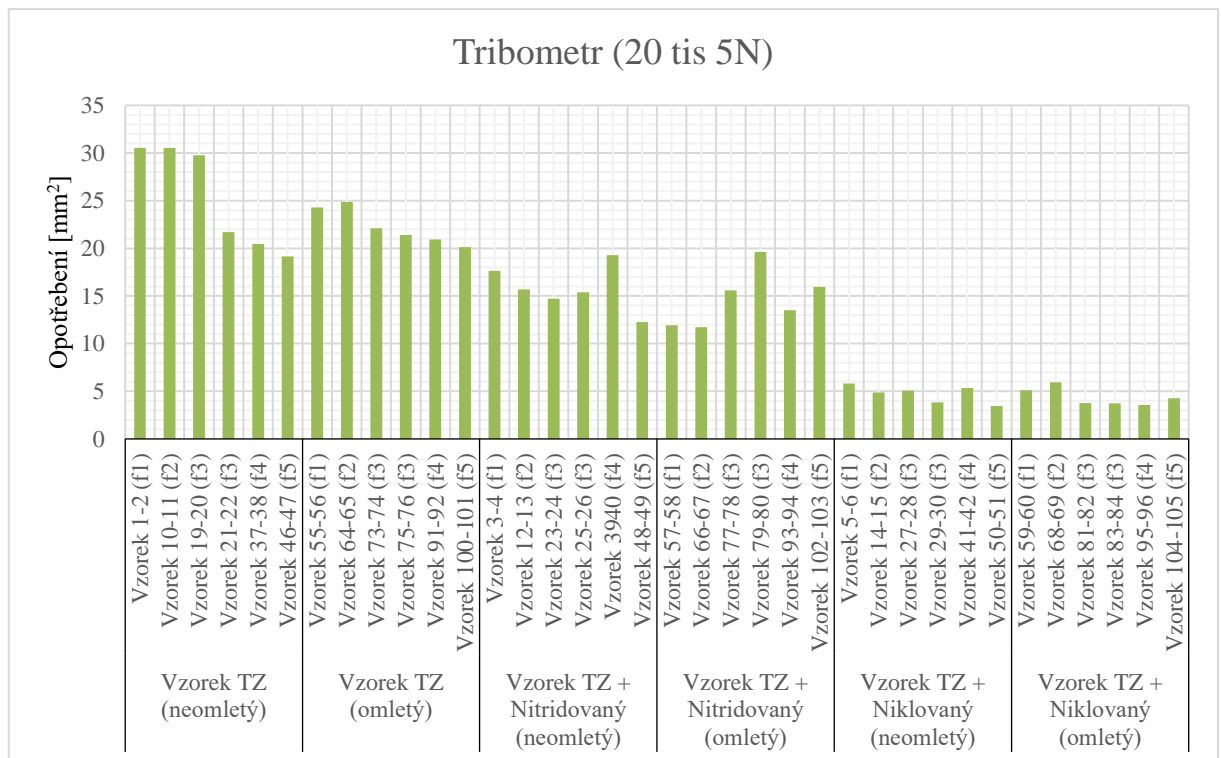
- 1,8 tis cyklů
 - 5 tis cyklů
 - 10 tis cyklů
 - 20 tis cyklů
- } při 3 ot. /s a zatížení 5 N

Po ukončení testu byly vytvořené tribologické stopy prozkoumány pomocí stereolupy. Jako rozměr pro porovnání opotřebení všech vzorků byla zvolena *plocha opotřebení*. Plocha lépe interpretovala vzájemné opotřebení například oproti šířce stopy.

Změřeny byly vždy vzorky, které byly upevněny na spodním držáku. Tyto vzorky vykazovaly lépe měřitelnou a pravidelnější stopu po opotřebení. Měření probíhalo tak, že byly nasnímány fotografie a posléze změřena délka a šířka stopy. Pokud docházelo k zužování stopy, byla dotyčná stopa rozdělena na více obdélníků a jejich plocha byla poté sečtena. Na jednu stopu bylo nutné použít 2-3 snímky podle vytvořené délky. V případě niklovaných vzorků nedocházelo zpravidla k vytvoření souvislé měřitelné stopy. Opotřebené byly většinou jen vrcholky výstupků po obrábění. Tady bylo nutno stopy naměřit, zprůměrovat a poté sečíst. Vzhledem k urychlení procesu opotřebení, nebyl použit žádný olej ani jiná lubrikační látka. Získané výsledky jsou zobrazeny v tabulce v příloze 16.



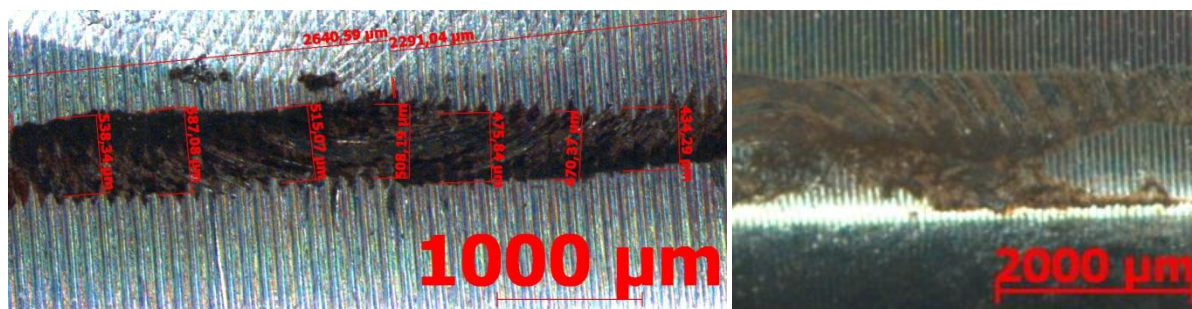
Obr. 81: Grafy všech opotřebení válečků na tribometru [autor]



Obr. 82: Grafy opotřebení válečků na tribometru po 20tis. cyklech a 5 N [autor]

Vzorky bez povrchové úpravy (pouze po tepelném zpracování)

Vzorky bez povrchové úpravy vykazovaly poměrně podobnou odolnost proti otěru, a to i přes rozdíly v drsnosti. Na následujících snímcích je zobrazen vývoj poškození u vzorku 55, který v tribologickém testu dopadl relativně nejhůře. Ostatní vzorky dopadly v testu lépe, viz výsledky uvedené v tabulce v příloze 16.

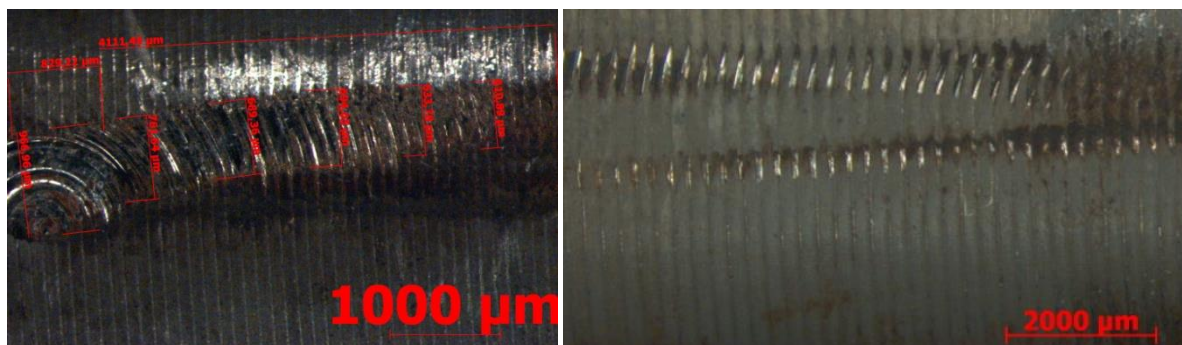


Obr. 83: Vzorek 11–20 zvětšení x, 1800 cyklů 5 N (vlevo); Vzorek 55 - 10x zvětšení - 5 tis. cyklů, 5 N zátěž (vpravo)

Vzorky s povrchovou úpravou vytvořenou nitridací

Na následujících snímcích jsou zobrazeny stopy u vzorku, který dopadl z celého testu nejhůře. Jedná se o vzorek č. 49. Na obrázku č. 84 vpravo je patrný začátek poškození a vpravo již značné porušení (vrstva již přestala plnit svoji funkci).

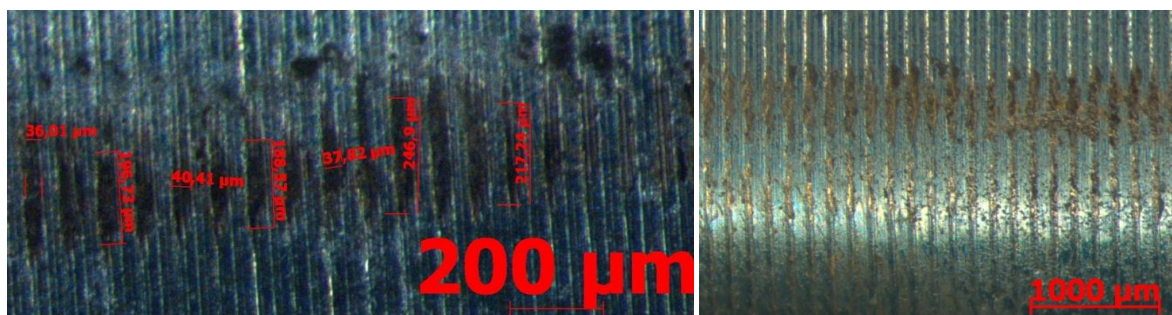
Ostatní vzorky dopadly v testu lépe, viz výsledky uvedené v tabulce v příloze 16. Vliv povrchové drsnosti se projevuje pouze u vzorků s vyššími hodnotami drsnosti.



Obr. 84: Vzorek 13 - 20x zvětšení - 20tis. cyklů 5 N (vlevo); Vzorek 49 - 10x zvětšení - 5 tis. cyklů, 5 N zátěž (vpravo)

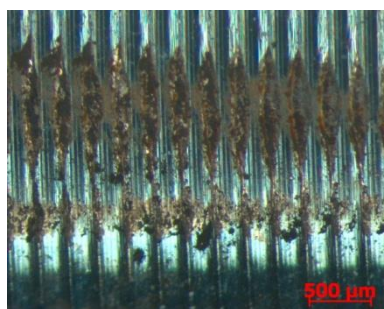
Vzorky s povrchovou úpravou vytvořenou bezproudým niklováním

Vzorek 27 nevykazoval opotřebení ani po 50tis. cyklech při zatížení 5 N, kdy zde vznikla obtížně měřitelná nesouvislá stopa, a proto byl pro kontrolu u tohoto vzorku proveden ještě jeden cyklus - 100 tis cyklů při 10 N zátěži. Na tomto vzorku v nejvíce namáhaném místě již bylo možno nalézt souvislou měřitelnou stopu při změřeném poškození povrchu v délce cca 920 µm. Přesto ani v tomto případě nelze hovořit o tom, že tento vzorek by se choval jako opotřebovaný.



Obr. 85: Vzorek 5- 20x zvětšení - 1800 cyklů 5N (vlevo); Vzorek 27- 20x zvětšení - 20 tis cyklů, 5N zátěž (vpravo)

V tomto experimentu ze vzorků s niklovaným povrchem dosáhl relativně nejhorší výsledek vzorek 51, ale ani zde nebylo zjištěno rozsáhlé poškození. Rozdíly mohou být způsobeny statistickou odchylkou. Lze konstatovat, že vzorky s povrchem bezproudého niklu obstály v testu nejlépe. Na snímku (obrázek č. 86) jsou zachyceny dvě stopy opotřebení vytvořené během testu: po 5tis. cyklech při zatížení 5 N (dolní stopa) a 20tis. cyklech při zatížení 5 N (horní stopa), stopa je souvislá a dobře měřitelná, přesto lze tuto vrstvu stále považovat i v místě kontaktu za funkční.



Obr. 86: Vzorek 51 s Ni povrchovou úpravou – 30x zvětšení.

Diskuze nad výsledky

Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány analýzou rozptylu (ANOVA). Tato metoda ze zkušeností vykazuje nejlepší výsledky pro analyzování povrchu a jeho opotřebení. Pro zpracování analýzy byl použit SW QC Expert.

Mezi sledované prediktory (faktory) byly zařazeny: Posuv, Stav povrchu (povrchové zpevnění), počet cyklů a parametry drsnosti Ra, Rz, Rk, Rpk, Rvk, A1, A2, Mr1 a Mr2. Při porovnání všech těchto parametrů vyšlo, že téměř žádný z nich *není statisticky významný* – viz tab. 9. Bylo to dané tím, že parametry drsnosti jsou zde brány jako spojité proměnné a vzhledem k velkému množství dat analýza rozptylu nebyla schopná mezi rozdílnými veličinami najít statisticky významnou hodnotu.

Tab. 9: ANOVA pro jednotlivé faktory

Prediktor (faktor)	Parametr	Součet čtverců odchylek	Hodnota Fischerovy testovací statistiky	Hladina významnosti p-hodnota	Významnost
	Posuv	79,417	0,392	0,814	Nevýznamný
	Stav povrchu	3335,981	24,375	0,000	Významný
	počet cyklů	2380,252	23,469	0,000	Významný
	Ra (první vzorek)	67,818	1,376	0,243	Nevýznamný
	Ra (druhý vzorek)	70,572	1,433	0,233	Nevýznamný
	Rz (první vzorek)	83,773	1,704	0,194	Nevýznamný
	Rz (druhý vzorek)	59,542	1,207	0,274	Nevýznamný
	Rk (první vzorek)	55,014	1,115	0,293	Nevýznamný
	Rk (druhý vzorek)	46,600	0,943	0,333	Nevýznamný
	Rpk (první vzorek)	71,084	1,443	0,232	Nevýznamný
	Rpk (druhý vzorek)	44,397	0,898	0,345	Nevýznamný
	Rvk (první vzorek)	50,288	1,018	0,315	Nevýznamný
	Rvk (druhý vzorek)	34,516	0,697	0,405	Nevýznamný
	A1 (první vzorek)	74,737	1,518	0,220	Nevýznamný
	A1 (druhý vzorek)	53,263	1,079	0,301	Nevýznamný
	A2 (první vzorek)	55,097	1,116	0,293	Nevýznamný
	A2 (druhý vzorek)	87,746	1,786	0,184	Nevýznamný
	Mr1 (první vzorek)	10,936	0,220	0,640	Nevýznamný
	Mr1 (druhý vzorek)	22,660	0,457	0,500	Nevýznamný
	Mr2 (první vzorek)	51,424	1,041	0,309	Nevýznamný
	Mr2 (druhý vzorek)	82,496	1,678	0,197	Nevýznamný

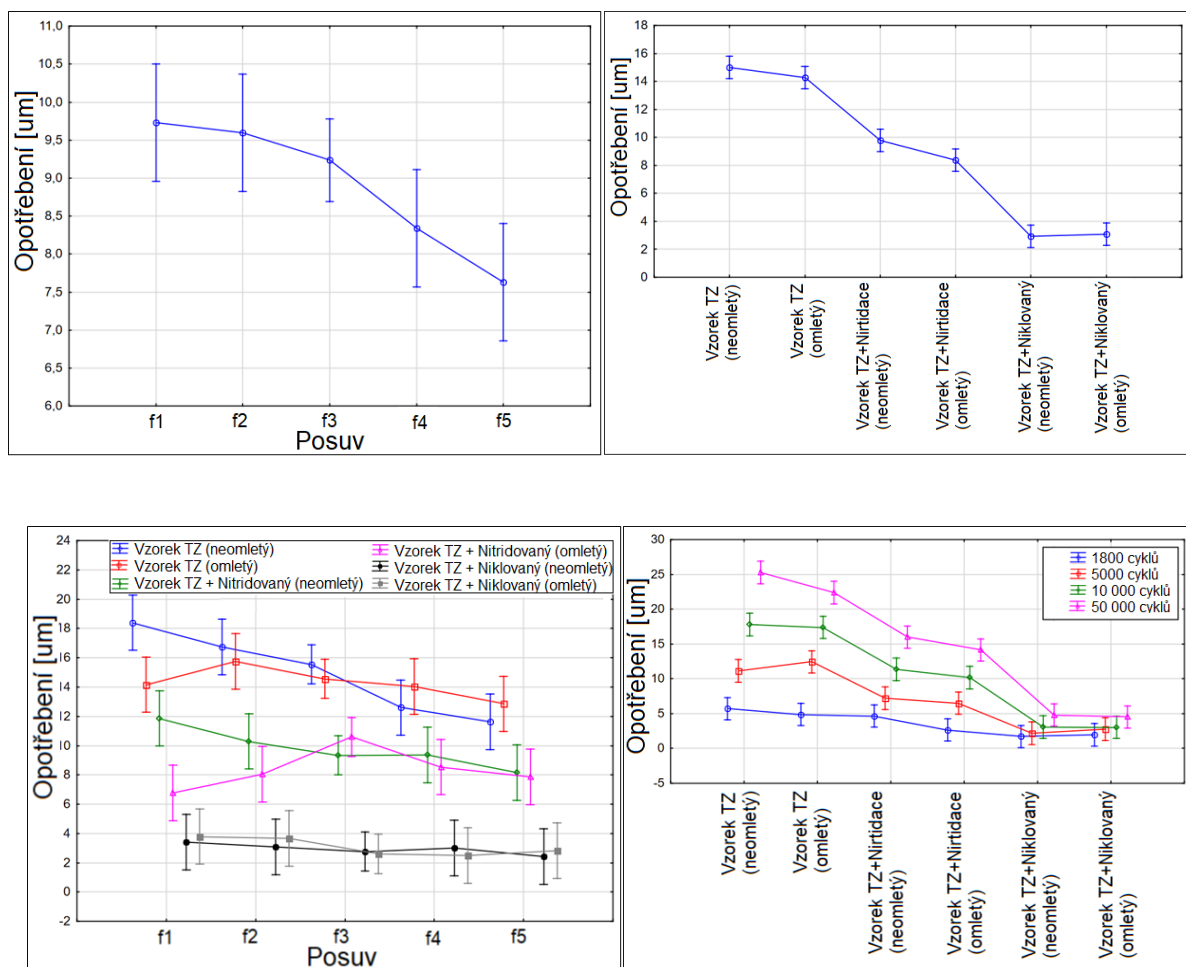
Tab. 10: ANOVA č.2 pro jednotlivé faktory

Prediktor (faktor)	Součet čtverců odchylek	Stupeň volnosti	Průměr součtu odchylek	Hodnota Fischerovy testovací statistiky	Hladina významnosti p-hodnota	Významnost
Intercept (výchozí hodnota)	10575,68	1	10575,68	3153,183	0,0000	Významný
Posuv	79,42	4	19,85	5,920	0,0018	Významný
Stav povrchu	3032,73	5	606,55	180,844	0,0000	Významný
Počet cyklů	2189,96	3	729,99	217,648	0,0000	Významný
Posuv*Stav povrchu	155,17	20	7,76	2,313	0,0258	Významný
Posuv*počet cyklů	22,95	12	1,91	0,570	0,8443	Nevýznamný
Stav povrchu*počet cyklů	800,49	15	53,37	15,911	0,0000	Významný
Posuv*Stav povrchu*počet cyklů	189,11	60	3,15	0,940	0,5912	Nevýznamný
Chyba	80,50	24	3,35			

Pro druhou analýzu rozptylu byly z faktorů odstraněny všechny parametry drsnosti povrchu (Ra, Rz, Rk, Rpk, Rvk, A1, A2, Mr1 a Mr2). Drsnost povrchu zde byla zastoupena faktorem

„Posuv“. Při této analýze byly dále uvažovány i některé dvojice faktorů, které by mohly být statisticky významné – viz tab. 10.

Při porovnání všech těchto parametrů vyšlo, že faktory Posuv, Stav povrchu, Počet cyklů a dvojice Posuv*Stav povrchu a Stav povrchu*počet cyklů jsou *statisticky významné*. To znamená, že se dá z těchto faktorů usoudit určité závěry. Tyto závěry jsou snáze interpretovatelné pomocí grafů – viz. níže.



Obr. 87: Grafy závislosti jednotlivých faktorů hodnotami menších čtverců

Dále byl post-hoc ANOVY vypracován Scheffeho test pro dvojice všech výše zmíněných faktorů, kdy pomocí toho testu bylo při vícenásobném porovnání parametrů nalezeno, která párová srovnání jsou významná a které nikoliv. Tabulky vícenásobného porovnání jsou v příloze 17.

Shrnutí z hlediska použitých povrchových úprav:

Z tabulky 10 a grafů (obr. 81,82 a 87) vyplývá, že nejlepší výsledek z hlediska opotřebení byl dosažen na vzorcích s povrchovou úpravou *bezproudého niklování*. Tyto povlaky, jejichž tvrdost není výrazně vyšší, než u ostatních typů zkoušených povrchových úprav vykazují vynikající tribologické vlastnosti zapříčiněné velmi dobrými lubrikačními schopnostmi. Vzhledem k relativně tenkým naneseným vrstvám je však nutno počítat, že v případě její destrukce již

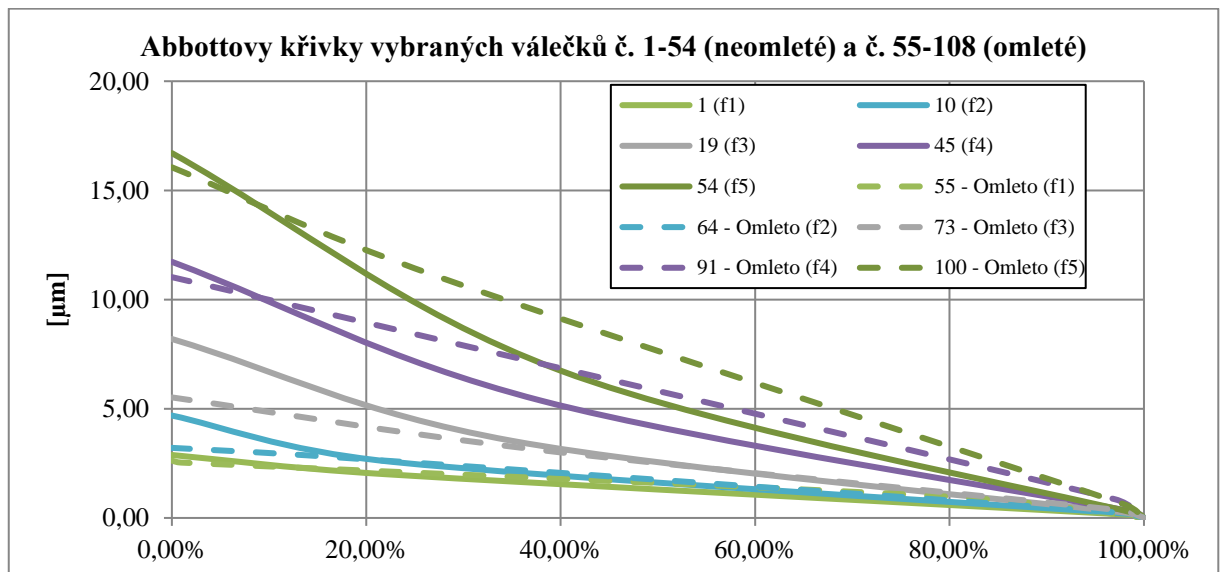
bude poškození narůstat. Viz vzorek 27, který dopadl v testu nejlépe, ale po delaminaci Ni vrstvy dochází ke značnému zvětšení tohoto poškození.

Tvrdostridovaná vrstva se projevila do relativně malých hloubek. Přesto vzorky s nitrídovaným povrchem vykazovaly vyšší odolnost proti opotřebení ve srovnání se vzorky bez povrchové úpravy. Vzhledem k malé tloušťce tvrdé vrstvy, docházelo k rychlé delaminaci a rozšiřování poškození. V počátečních fázích testu se u nitrídovaných vzorků zřejmě projevoval vliv povrchové drsnosti, kdy zřejmě docházelo ke koncentraci poškození na těchto výstupcích, které zabraňovaly relativně dlouhou dobu šíření dalšího stupně degradace vrstvy.

Vzorky pouze tepelně zpracované nevykazovaly rozdíl mezi omletým a neomletým stavem ani mezi různými stupni povrchové drsnosti. Již v počátečních fázích zatěžování docházelo na povrchu k tvorbě plošky, která se rychle zvětšovala.

Shrnutí z hlediska drsnosti povrchů:

Z výše uvedených grafů je dále patrné, že vyšší nejlépe vzorky obrobene vyššími posuvy na otáčku (f3-f5). Dodatečné omílání povrchu nemělo na opotřebení téměř žádný vliv, nebo pouze nepatrný.



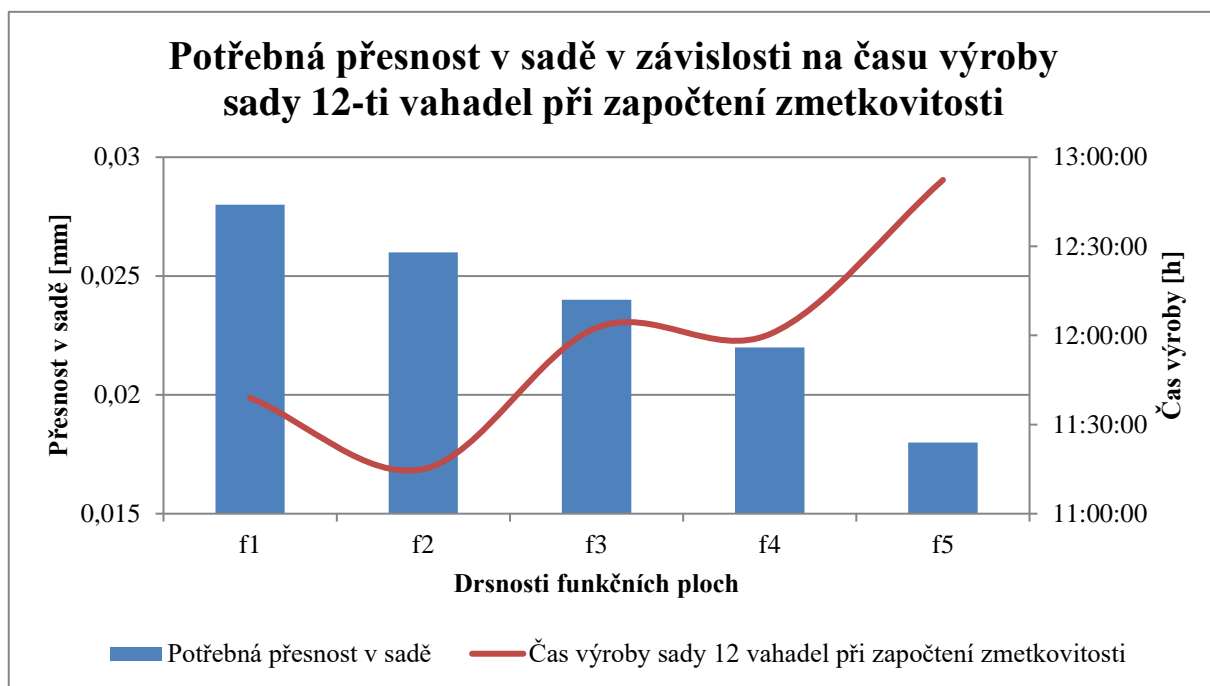
Obr. 88: Abbottovy křivky vybraných válečků č. 1-54 (neomleté) a č. 55-108 (omleté)

Je žádoucí se ale na tuto problematiku zaměřit i z jiného pohledu. Při pohledu na graf Abbottových křivek (obr. 88) je vidět, jak jsou křivky posuvu f4-f5 a vlastně i neomletého f3 relativně strmé. Vrcholky u posuvu f5 jsou téměř 20μm. Při prvotním zaběhnutí se zpravidla „vrcholky“ snížily o cca 1/3. To v absolutních číslech u drsnosti f5 vychází, na cca 0,007. Vzhledem k tomu že vahadla jsou ve vzájemném kontaktu, je potřeba tuto hodnotu ještě zdvojnásobit => ~0,015. Takováto hodnota je již kritická. Při pohledu zpět na graf (obr. 65) je patrné proč. Z tohoto grafu totiž vyplývá, že výroba vahadel by se měla pohybovat v absolutní přesnosti cca 0,03mm. V této oblasti se funkčnost ložiska láme a při horší přesnosti již ložisko nedokáže zachytit vychýlení >0,1°. Pokud je jen kvůli drsnosti „ukrojeno“ téměř 50 % z výrobní tolerance, tak to zbytečně prodražuje a komplikuje výrobu. Toto tvrzení potvrzuje i následující tabulka č. 11.

Bylo vyrobeno několik sad o 12-ti vahadlech a při vyšší drsnosti již musela být přesnost výroby natolik citlivá, že i při dodržení konstantní síly upnutí v čelistech přípravku, již nebylo možné dodržet nulovou zmetkovitost.

Tab. 11: Potřebná přesnost v sadě v závislosti na času výroby

Potřebná přesnost v sadě v závislosti na času výroby					
Drsnost	Potřebná přesnost v sadě	Čas výroby vahadla	Čas výroby sady 12-ti vahadel	Zmetkovitost v sadě	Čas výroby sady 12-ti vahadel při započtení zmetkovitosti
f1	0,028	0:58:15	11:39:00	0	11:39:00
f2	0,026	0:56:15	11:15:00	0	11:15:00
f3	0,024	0:55:35	11:07:00	1	12:02:35
f4	0,022	0:55:25	11:05:00	1	12:00:25
f5	0,018	0:55:10	11:02:00	2	12:52:20



Obr. 89: Potřebná přesnost v sadě v závislosti na času výroby sady 12 vahadel při započtení zmetkovitosti

Dalším neméně důležitým aspektem, je v případě vyššího posuvu, vyšší součinitel tření mezi vahadly. S ohledem na to, že jsou vahadla zaplavená olejem, není možné s určitou přesností zjistit, jak moc drsnost funkčních povrchů ovlivňuje vzájemné odvalování. Je ale téměř jisté, že by to mělo negativní dopad.

Z tohoto důvodu a vzhledem k takřka totožným hodnotám opotřebení pro posuv f1 i f2, byl z ekonomického hlediska pro další testování na speciálním tribologickém standu (frekvenční zatížení, statické zatížení) vybrán povrch obroběný posuvem f2.

Vybrané vzorky byly komplexně odzkoušeny v následující kapitole na speciálním tribologickém standu umožňující kontakt při dané frekvenci a silovému účinku zatížených vzorků v soustavě váleček – váleček nebo váleček – plochý vzorek.

7.3.6 Konstrukční návrh a výroba speciálního tribologického standu

Vzhledem k potřebě zjištění reálných tribologických vlastností vahadel, bylo nutné postavit testovacího zařízení, které se svými technickými předpoklady bude nejvíce přibližovat reálným podmínkám.

Prvotní vstupní požadavky pro testování byly:

- testované válečky budou mechanicky namáhány silou do několika kN,
- testované válečky budou v předepsané olejové lázni,
- budou zde působit různá doplňková zatížení,
- možnost změny úhlu stykové plochy testovaných párovaných vzorků,
- veškeré činnosti budou pod působením kmitavé zátěže ve frekvenci 50+60 Hz,
- plynulé změny frekvence vibrací,
- možnost plynulého zatěžování,
- snadné vyjmutí a vložení vzorků jednotlivých sad materiálů.

Z těchto základních podmínek bylo přistoupeno k tvorbě možných variant pro budoucí návrh celkového testovacího zařízení. Vzhledem k těmto vstupním podmínkám byli otevřené možnosti pro návrh zařízení, ze kterého vzešlo několik návrhů.

Možnosti na čistě mechanickém základu byly po podrobnějším rozpracování postupně odloženy z důvodů nemožnosti následného nastavování některých parametrů bez nutnosti „přestavby“ celého nebo částí budoucího zařízení.

Následovalo zpracování elektro-mechanických variant, které jsou příznivější pro následné změny některých parametrů. Vzniklo proto několik variant, které byly zpracovány do konstrukčních skic s ekonomickým rozpisem materiálu pro celkové zhotovení.

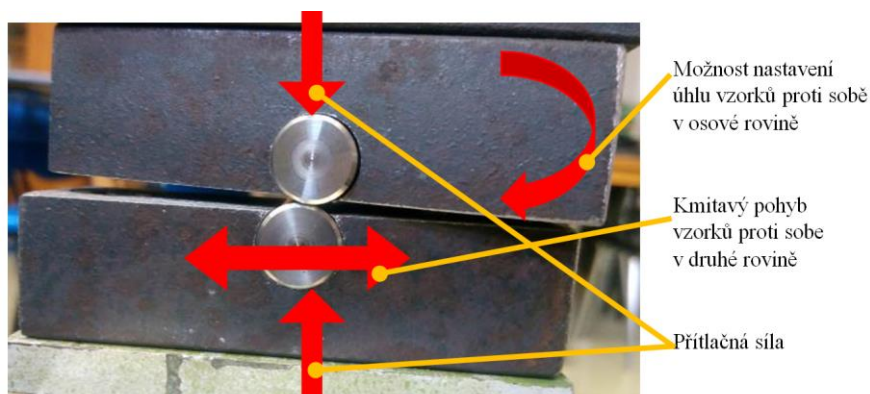
Finanční požadavek se na stavbu vybraného zařízení, po detailním návrhu na tvorbu, začal pohybovat v řádech statisíců Kč. Vzhledem k tomuto zjištění bylo přistoupeno ke změně vstupních požadavků a konstrukční variantě s využitím upravených stávajících zařízení.



Obr. 90: Základní rám připravený pro montáž držáků

Pro testování byl nakonec využit již vyhotovený rám stroje, který je využíván pro testování silových poměrů, je vybaven tenzometrickými snímači a je stavěn na silovou zátěž do 15 tun. Na tomto zařízení byly přimontovány nové konstrukční prvky pro držení vzorků včetně možnosti jejich zatížení konstantní silou. Byl splněn i požadavek na možnost nastavení úhlu ve stykové ploše mezi testovanými vzorky => jedna čelist (držák vzorku) je v tomto případě úhlově nastavitelná pevná a druhá se pohybuje v požadované rovině v definované frekvenci a velikosti zdvihu. U tohoto sestavení bylo myšleno i na plynulou změnu velikosti osového zatížení (přítlačné síly), která působí na tyto dva držáky, ve kterých jsou upnuty vzorky testovaného materiálu. Současně byla také splněna nutnost snadného vložení/vyjmutí testovaných vzorků bez jejich mechanického poškození.

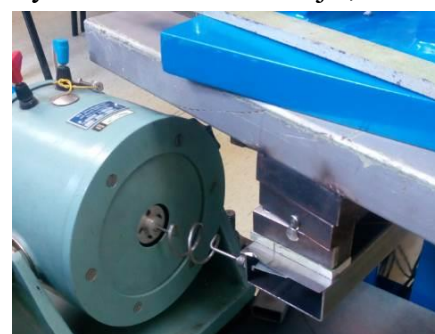
Tyto držáky splňují jednoduchost, ale zároveň potřebné pevné sevření po ploše tak, aby nedocházelo k jejich posunu, pootočení apod. Jsou též vytvořeny tak, aby splňovali nastavitelnost v druhé ose a dvojice vzorku byla nastavena do čárové stykové roviny.



Obr. 91: Detail usazení vzorků proti sobě v držácích s vyznačením možnosti pohybů

Kmitavý pohyb byl po některých funkčních variantách, které byli konstrukčně složitější, zvolen na principu frekvenčního budiče s příslušenstvím. Jako zdroj měnitelné frekvence zde slouží frekvenční generátor s plynulou změnou od 0 Hz do 10 MHz s možností změny profilu signálu sinus, trojúhelník, obdélník. Toto zařízení je vhodné pro bezobslužné a bezúdržbové řešení, u kterého byly vždy zachovány nastavené podmínky provozu po celou dobu testů.

Kontrolní snímání intenzity frekvence bylo kontinuálně prováděno pomocí akcelerometrické sestavy pro měření intenzity kmitání (akcelerometrická souprava se zobrazením výsledků na osciloskopu a záznamem do PC).



Obr. 92: Detail na nastavitelné držáky a budič kmitů

Vzhledem k požadavku na konstantní přítlačnou sílu s kmitavým pohybem obou vzorků proti sobě, byl technicky tento problém vyřešen pomocí fyzikálně definované gravitační tíhy. Přítlačná síla se „plynule“ měnila pomocí kalibrovaných závaží. Tímto principem bylo zajištěno, že přítlačná síla byla po celou dobu prováděného testu konstantní. Toto řešení nepodléhalo potížím s uvolňováním při vibracích, jako v případě použití přítlačných šroubových spojů, hydraulických obvodů nebo kombinací obou těchto principů.

Veškeré technické prvky, byly konstruovány z hlediska nákladů, jednoduchosti, funkčnosti, včetně minimálních nároků na výrobní technologie.

Již v průběhu konstrukčního návrhu bylo čím dál tím jasnější, že podmínka, aby testované válečky byly mechanicky namáhány silou několika kN, bude nesplnitelná při požadavku kmitavém pohybu mezi válečky. Pro zachování kmitavého pohybu by bylo zapotřebí překonat třecí odpor vzniknuvší mezi zatěžovanými válečky, a to by znamenalo postavit daleko robustnější zařízení v řádech několika stovek tisíc Kč. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k rozdělení jednoho komplexního testu na dva dílčí:

- Frekvenční test.
- Statický test.

7.3.7 Frekvenční tribologický test vybraných vzorků

Cílem navržených experimentů frekvenčního zatížení bylo porovnání chování vybraných povrchových úprav a sledovat jejich odezvu na frekvenční zatížení. Frekvenční test byl proveden jak pro sestavu *Válec / Válec*, tak i pro sestavu *Válec / Plochu* (destičku).

Předpokladem správného návrhu zkušebního zařízení byla znalost opotřebení, které je definováno dle normy ČSN 015050⁸ „Opotřebení materiálu“ (viz. kapitola 7).

7.3.7.1 Nastavení okrajových podmínek testování vzorků

V případě frekvenčních testů na tribologickém standu se zatěžovací síla mohla reálně pohybovat do 60 N. Toto omezení zatěžující síly se ale neprokázalo být jako nijak zvlášť limitující z hlediska tvorby opotřebení.

Aby bylo zajištěno, že bude možné otestovat při stejných podmínkách všechny vzorky, bylo provedeno několik doplňujících testů pro nastavení okrajových podmínek, které byly následně použity v hlavním testování vzorků. Na tyto frekvenční testy pro nastavení okrajových podmínek byly vybrány válečky s povrchem zpevněným bezproudým niklováním a nitridací, které z předchozích testů vykazovali nejlepší hodnoty opotřebení => bylo potřeba nastavit okrajové podmínky tak, aby vzniklo opotřebení právě i na těchto válečkách.

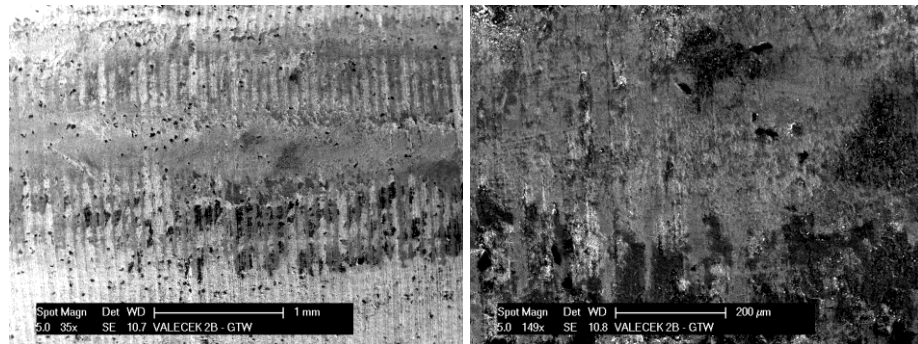
Proměnné:

- přítláčná síla,
- velikost posuvu (amplituda kmitu),
- frekvence,
- počet kmitů,
- mazání.

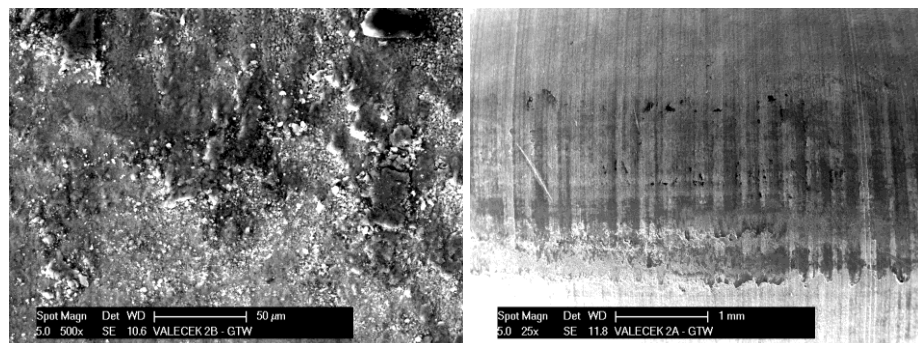
⁸ Tato norma byla zrušena bez náhrady

Testy pro nalezení okrajových podmínek jsou chronologicky popsány v příloze č. 18. Jako vhodné zátěžné podmínky se nakonec ukázaly tyto:

- přitlačná síla 15 N,
- velikost posuvu $\pm 0,2$ mm,
- rychlost kmitů 50 Hz
- počet kmitů: 1 000 000,
- bez mazání.



Obr. 93: Detail rozsáhlejší opotřebení o šířce 0,67 mm horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 6



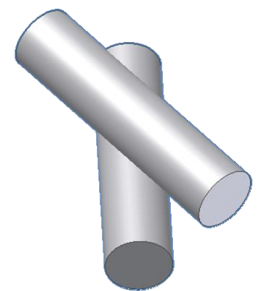
Obr. 94: Vedle adhezních vrstev docházelo často také k zahlazení povrchu a stop po předchozím obrábění. Nikde nedošlo k poškození soudržnosti vrstvy nitridů

Z výše uvedených snímků vyplývá, že přestože byly použity "měkčí" parametry kontaktního namáhání (především síla), tak došlo k většímu poškození. Vzhledem k této skutečnosti, byly tyto okrajové podmínky vybrány pro hlavní testování vzorků.

7.3.7.2 Sestava Válec na Válec

Smyslem tohoto testu bylo docílení „bodového dotyku“ mezi vzorky a tím dosažení simulace pravděpodobného zatížení při provozu vahadel v turbíně při sestavení *Válec / Válec*.

Uspořádání testu bylo podle následujícího obr. 95. Dva válečky o průměru 12 mm, se stejnou drsností, opatřené stejnou povrchovou úpravou, které byly vůči sobě přesazeny pod úhlem 15° a byly zatíženy vzájemně proti sobě pomocí závaží. Vrchní váleček byl pevně upnut ve



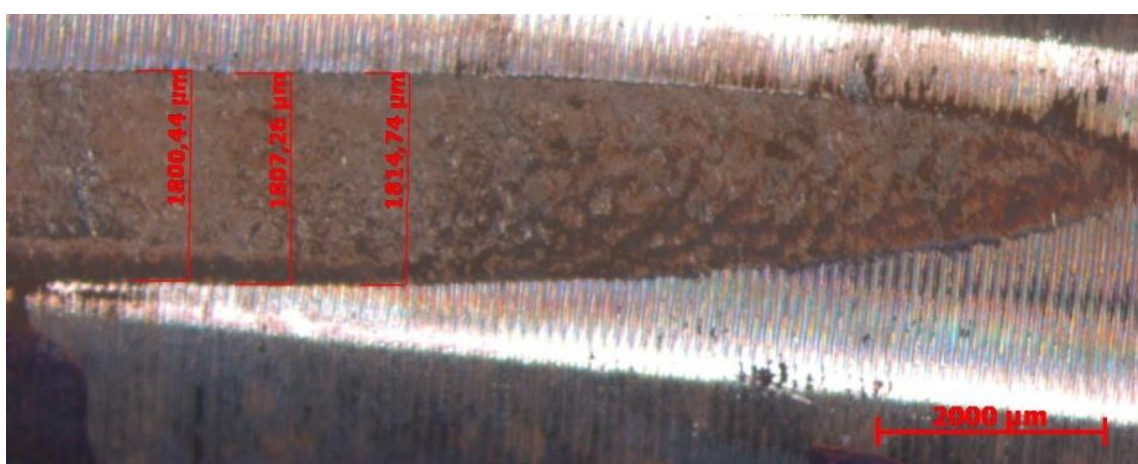
Obr. 95: Uspořádání testu – Poloha válečků vůči sobě

vodorovném držáku a spodní váleček byl upevněn na pohyblivém rameni, kde bylo přes páku vyvozeno provozní zatížení. K rameni bylo pružně připevněno jádro elektromagnetické cívky, které vyvozovalo příslušné kmity. Jejich frekvence byla stanovena na 50 Hz, které jsou nejbližší předpokládané pracovní frekvenci budoucích strojních součástí.

Vzorky byly vždy 2 x 2 pouze tepelně zpracované (TZ=> zušlechtěné), nitridované a niklované.

Zdokumentované stopy

V následujících odstavcích jsou popsána jednotlivá opotřebení u vybraných vzorků vč. dokumentace vybraných stop. Tato dokumentace byla pořízena pomocí stereolupy. Měření probíhalo tak, že stopa byla rozdělena podle snímků a poté byly získané plochy sečteny.



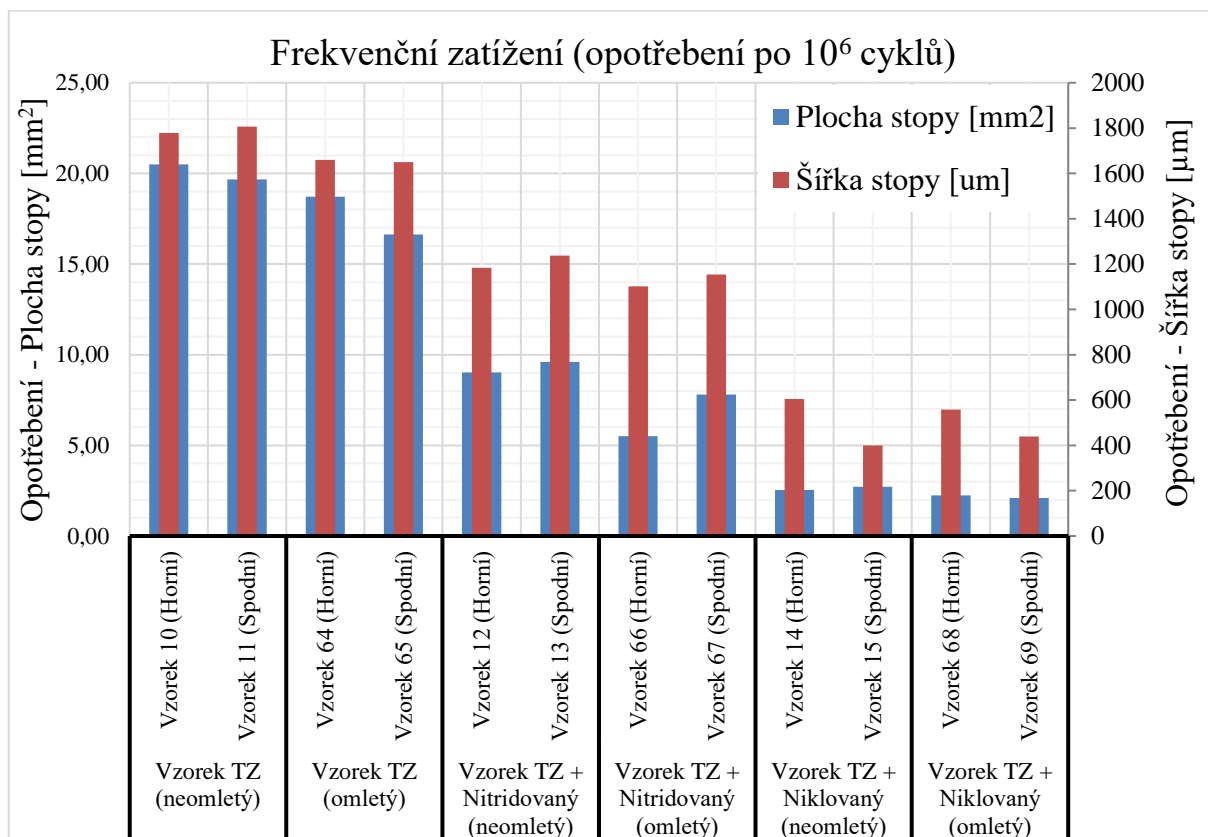
Obr. 96: Vzorek 11 – měření stopy 10x zvětšení

V následující tabulce je zobrazena průměrná hodnota plochy a šířky stopy opotřebení.

Tab. 12: Změřené šířky stop po frekvenční zkoušce pro sestavení Válec / Válec

Vzorky		Hodnoty opotřebení	
		Plocha stopy [mm ²]	Šířka stopy [μm]
Vzorek TZ (neomletý)	<i>Vzorek 10 (Horní)</i>	20,49	1778
	<i>Vzorek 11 (Spodní)</i>	19,67	1807
Vzorek TZ (omletý)	<i>Vzorek 64 (Horní)</i>	18,71	1659
	<i>Vzorek 65 (Spodní)</i>	16,64	1650
Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	<i>Vzorek 12 (Horní)</i>	9,02	1183
	<i>Vzorek 13 (Spodní)</i>	9,61	1237
Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	<i>Vzorek 66 (Horní)</i>	5,50	1101
	<i>Vzorek 67 (Spodní)</i>	7,80	1154
Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	<i>Vzorek 14 (Horní)</i>	2,54	604
	<i>Vzorek 15 (Spodní)</i>	2,71	400
Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	<i>Vzorek 68 (Horní)</i>	2,24	558
	<i>Vzorek 69 (Spodní)</i>	2,10	439

Na následujícím grafu (obr. č. 97) je vidět porovnání opotřebení mezi jednotlivými vzorky.

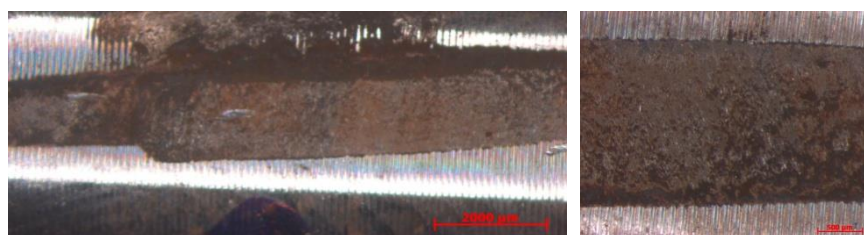


Obr. 97: Frekvenční zatížení (všechny vzorky dohromady)

Dokumentace vtisků

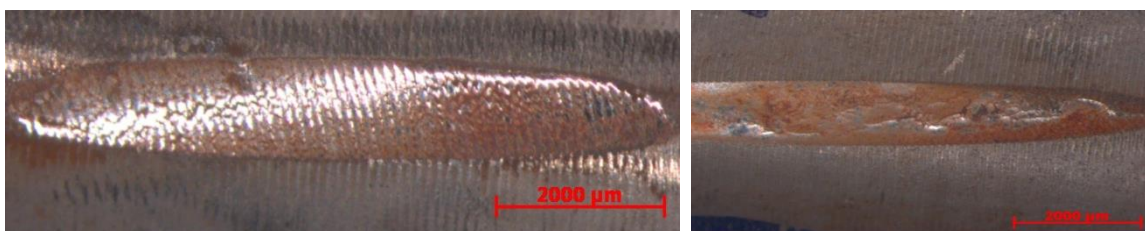
Na následujících obrázcích jsou zdokumentované stopy na vybraných vzorcích.

Vzorek pouze tepelně zpracovaný (TZ => zušlechťený):



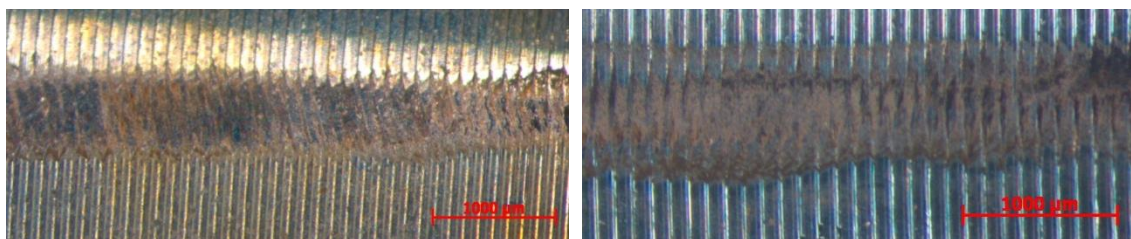
Obr. 98: Vzorek 10 spodní neupravený, 10x zvětšení (vlevo); Vzorek 11 horní neupravený, 30x zvětšení (vpravo)

Vzorek nitridovaný:



Obr. 99: Vzorek 66 nitridace, 10x zvětšení (vlevo); Vzorek 67 nitridace, 10x zvětšení (vpravo)

Vzorek niklovaný:

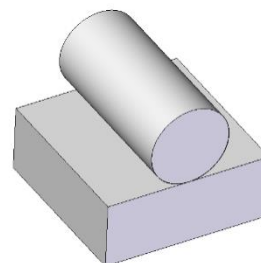


Obr. 100: Vzorek 14 niklování, 20x zvětšení (vlevo); Vzorek 15 niklování, 20x zvětšení (vpravo)

7.3.7.3 Sestava Válec na Plochu

Smyslem tohoto testu bylo docílení „čárového dotyku“ mezi vzorky a tím dosažení simulace pravděpodobného zatížení při provozu vahadel v turbíně při sestavení *Válec / Plocha*.

Uspořádání testu bylo podle následujícího obr. 101. Váleček o průměru 12 mm, opatřený stejnou povrchovou úpravou jako destička byl zatížen proti destičce pomocí závaží. Destička byla pevně upnuta ve vodorovném držáku a váleček byl upevněn na pohyblivém rameni, kde bylo přes páku vyvozeno provozní zatížení. K rameni bylo pružně připevněno jádro elektromagnetické cívky, které vyvozovalo příslušné kmity. Jejich frekvence byla stanovena na 50 Hz, které jsou nejbližší předpokládané pracovní frekvenci budoucích strojních součástí.

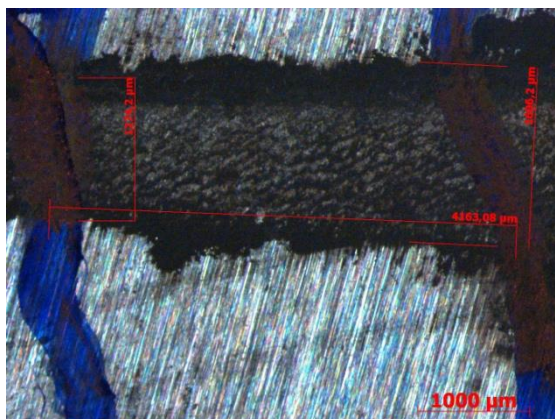


Obr. 101: Uspořádání testu – Váleček proti destičce

Vzorky byly tepelně zpracované (TZ=> zušlechtěné), nitrídované a niklované.

Zdokumentované stopy

Po vykonání frekvenčního testu opotřebení byly následně vzorky proměřeny pomocí stereolupy. Proměřena byla zasažená plocha jak na válečku, tak na destičce. Jelikož byla stopa delší, než mohlo být zobrazeno na objektivu, tak bylo potřeba tuto stopu po opotřebení rozdělit na několik snímků. Tyto naměřené plochy byly následně sečteny. Stejný postup byl aplikován i v případě měření šířky stopy, kde byl poté vypočítán její průměr.



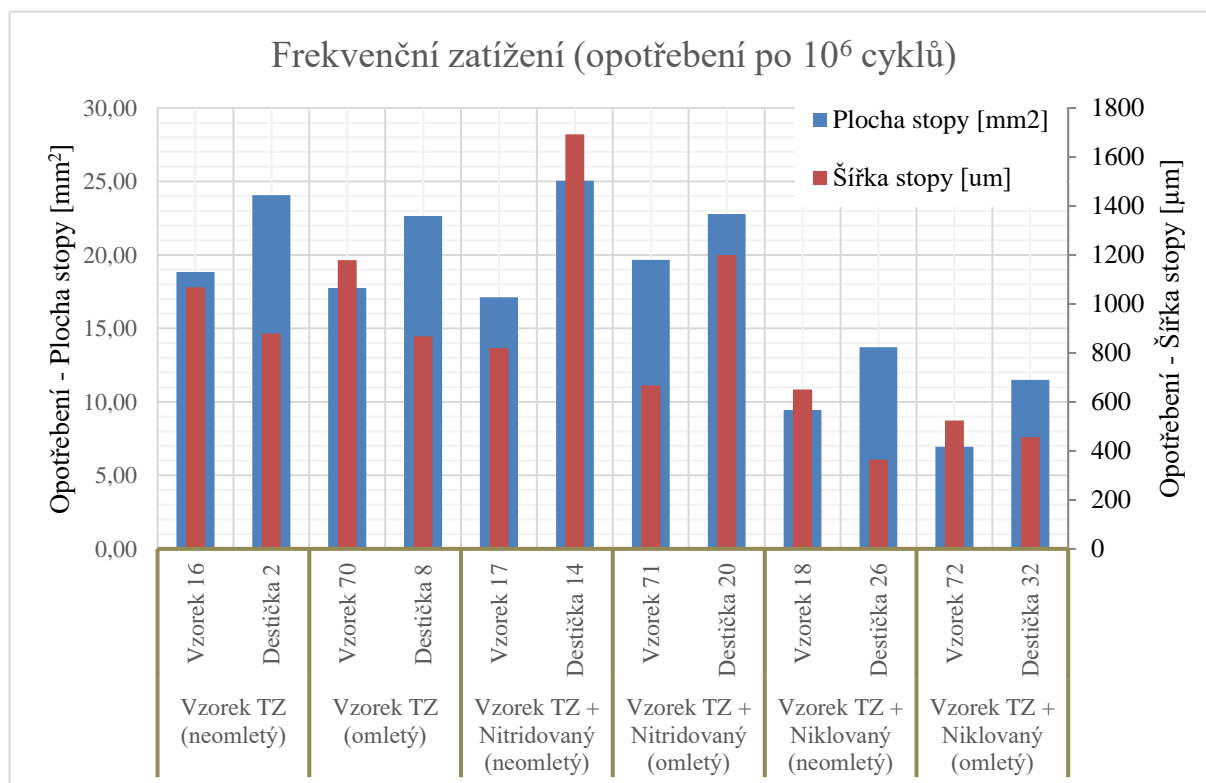
Obr. 102: Vzorek 70: Destička 8 – nepovlakovaná (měření plochy)

V následující tabulce je zobrazena plocha opotřebení a průměrná hodnota šířky stopy opotřebení.

Tab. 13: Změřené šířky stop po frekvenční zkoušce pro sestavení Válec / Plocha

Vzorky		Hodnoty opotřebení	
		Plocha stopy [mm ²]	Šířka stopy [μm]
Vzorek TZ (neomletý)	Vzorek 16	18,83	1068
	Destička 2	24,06	879
Vzorek TZ (omletý)	Vzorek 70	17,74	1179
	Destička 8	22,64	868
Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	Vzorek 17	17,12	819
	Destička 14	25,04	1692
Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	Vzorek 71	19,66	668
	Destička 20	22,78	1200
Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	Vzorek 18	9,45	650
	Destička 26	13,72	365
Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	Vzorek 72	6,94	524
	Destička 32	11,49	456

Na následujícím grafu (obr. č. 103) je vidět porovnání opotřebení mezi jednotlivými vzorky.

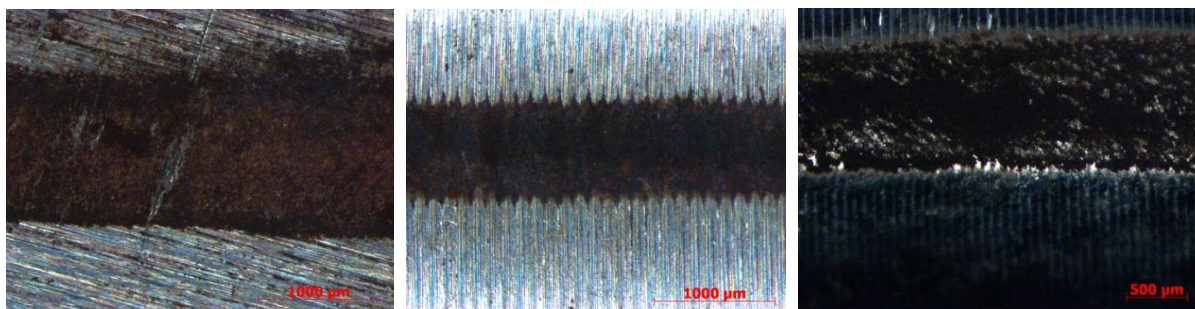


Obr. 103: Frekvenční zatížení (všechny vzorky dohromady)

Dokumentace vtisků

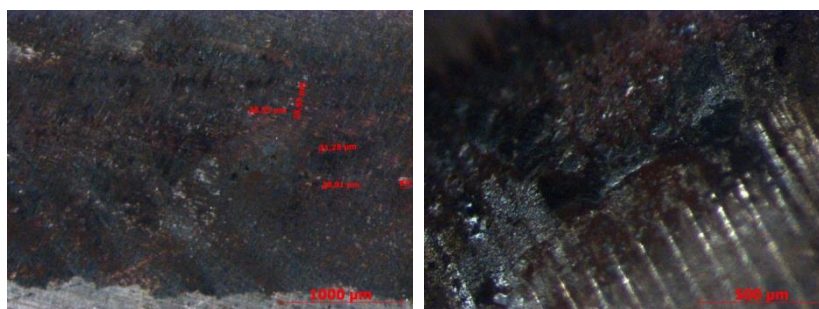
Na následujících obrázcích jsou zdokumentované stopy na vybraných vzorcích.

Vzorek pouze tepelně zpracovaný (TZ => zušlechťený):



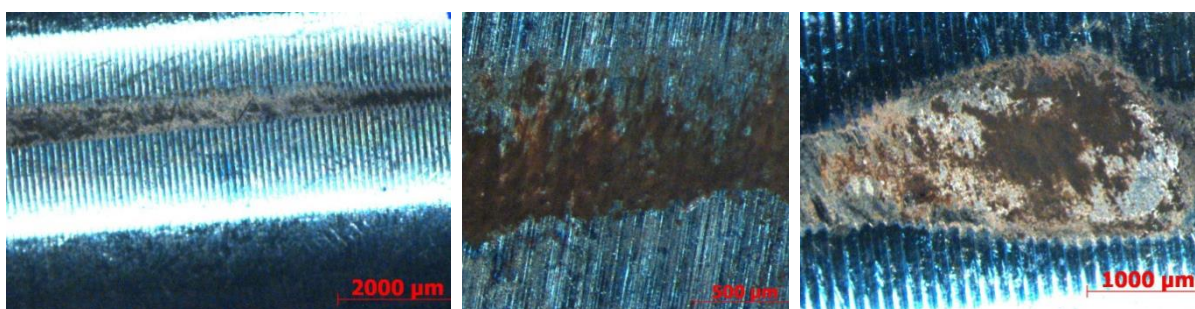
Obr. 104: Destička 2 – Jen TZ, 30x zvětšení (vlevo); Vzorek 16 (váleček) – Jen TZ, 30x zvětšení (střed); Vzorek 70 (váleček) Jen TZ, 30x zvětšení (vpravo)

Vzorek nitridovaný:



Obr. 105: Destička 14 - nitridace, 30x zvětšení, změření úlomků vrstvy (vlevo); Váleček 17 - nitridace, 63x zvětšení – detail degradace nitridované vrstvy (vpravo)

Vzorek niklovaný:



Obr. 106: Váleček 18 niklování, 10x zvětšení (vlevo); Destička 32, 40x zvětšení (střed); Váleček 72, niklování, 20x zvětšení (vpravo)

7.3.7.4 Diskuze nad výsledky

Sestava Válec/Válec

Nejlépe v testu obstály vzorky niklované. Obsah jejich opotřeбенé plochy byl cca poloviční než u vzorků nitridovaných. Nelze ale samozřejmě jednoznačně říci, že tyto povrchy budou

vykazovat 4-násobnou odolnost oproti neupraveným reálným součástím, které navíc budou intenzivně mazány. U některých vzorků byla navíc patrná jistá fragmentace niklovaného povlaku na okraji vzniklé stopy. Velikost těchto úlomků byla v řádech jednotek μm ($<10 \mu\text{m}$). Vzhledem k tloušťce olejového filmu ložiska, která je většinou v rozmezí 25-40 μm , ale bylo potřeba se na tyto fragmentace zaměřit.

Nitridované vzorky vykázaly zhruba o polovinu nižší stupeň opotřebení než vzorky neupravené, nitridovaná vrstva si tedy částečně zachovala svoje vlastnosti i přes odkrytí základního materiálu.

Na vzorcích povrchově neupravených a vzorcích nitridovaných se objevilo značné množství oxidů vzniklých v procesu vzájemného tření vzorků o sebe. U vzorků niklovaných bylo toto množství menší. Toto lze připsat velmi dobrým přirozeným lubrikačním vlastnostem niklového povrchu.

Sestava Válec/Plocha

Z hlediska opotřebované plochy dopadly nejlépe opět vzorky niklované. Opotřebovaná plocha byla u těchto vzorků cca poloviční, oproti nepovlakovaným a nitridovaným vzorkům. V této sestavě (tj. Válec/Plocha) se u niklovaného povrchu nepotvrdila snadná náchylnost k delaminaci a odpadnutí po větších částech a tím nebezpečí havárie olejového hospodářství. Toto nelze samozřejmě 100 % vyloučit, je zřejmě nutná důkladná výstupní kontrola součástí po niklování.

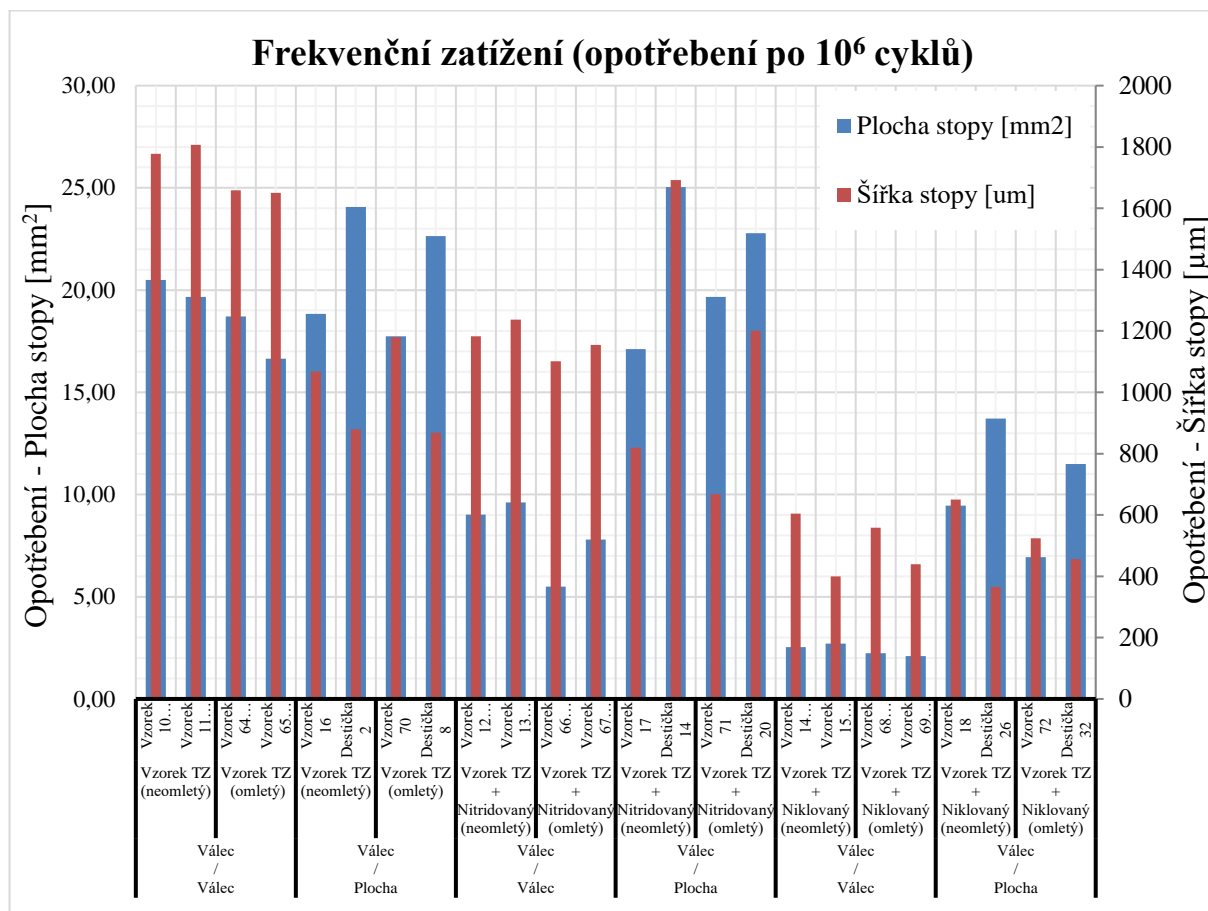
Opotřebovaná plocha u vzorků nitridovaných a nepovlakovaných nebyla příliš rozdílná. Zde bude zřejmě záležet na tloušťce nitridované vrstvy.

Zasažená plocha u destičky byla ve všech případech větší o cca 20 %, než u válečků.

Drsnost po obránění odolnost ovlivňuje, jelikož nejdříve přebírá opotřebení tyto partie, které jsou výrazně nad povrchem, takže není dlouho patrná stopa po opotřebení. Jestli zvýšení drsnosti vyváží možné problémy při následujícím použití v reálném nasazení je diskutabilní.

Válec/Válec vs. Válec/Plocha:

Sestavení Válec/Plocha vykazovalo obecně vyšší opotřebení. Je to dáno tím, že sestavení Válec/Plocha zaujímá celkově větší kontaktní plochu než sestavení Válec/Válec.



Obr. 107: Porovnání opotřebení sestav Válec/Válec a Válec/Plocha

7.3.8 Statický test vybraných vzorků

Cílem navržených experimentů statického zatížení bylo porovnání chování vybraných povrchových úprav a sledovat jejich odezvu na statické zatížení. Praktická ukázka experimentu je na obr. 108. Dalším úkolem bylo prověření adheze povlaků pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. Statické zkoušky byly prováděny pro provedení *Válec / Válec* a pro provedení *Válec / Plochu* (destičku).



Obr. 108: Uspořádání testu – Praktická ukázka

7.3.8.1 Nastavení okrajových podmínek testování vzorků

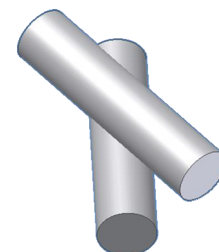
Hledání okrajových podmínek pro statický test bylo jednoduché. Vycházelo z jasného zadání, kdy velikost statické zátěže působící na axiální ložisko byla 180kN. Pokud by samo-vyrovnávací mechanismus ložiska fungoval perfektně, tak by na jednotlivá ramena vahadel působila síla 5 kN (~500 kg). Vzhledem ke skutečnosti, že v samo-vyrovnávacím mechanismu se vyskytují pasivní síly a s odkazem na měření geometrie vahadel (kapitola 7.2.2), je zřejmé, že na některá ramena vahadel bude působit síla násobně větší než nominálních 500 kg. Pro statický test proto byly vybrány tyto velikosti zátěží:

- 500 kg (nominální zátěž),
- 1000 kg (přetížení),
- 2000 kg (silné přetížení),
- 5000 kg (extrémní přetížení => samo-vyrovnávací mechanismus nefunguje).

7.3.8.2 Sestava Válec na Válec

Smyslem tohoto testu bylo docílení bodového dotyku mezi vzorky a tím dosažení simulace pravděpodobného zatížení při provozu vahadel v turbíně při sestavení *Válec / Válec*. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, v reálu dochází zřejmě k lokálnímu zablokování vahadel proti sobě, v důsledku vzájemného tření, čímž zřejmě vzniká na kontaktní ploše značné lokální poškození.

Jako první bylo rozhodnuto provést experiment statické zkoušky váleček proti válečku. Uspořádání testu bylo podle následujícího obr. 109. Dva válečky o průměru 12 mm se stejnou drsností, opatřené stejnou povrchovou úpravou byly zatlačeny vzájemně proti sobě hydraulickým mechanismem. Válečky byly přesazeny pod úhlem 15° při ekvivalentním zatížení odpovídající hmotnosti 500 kg, 1000 kg, 2000 kg a 5000 kg. Zatížení trvalo 10 vteřin. Velikost zatížení bylo měřeno tenzometrickým snímačem.

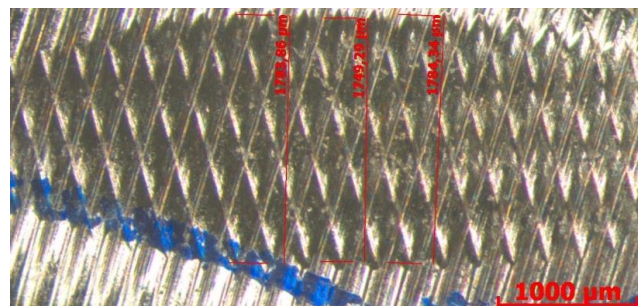


Obr. 109: Uspořádání testu – Poloha válečků vůči sobě

V následujících odstavcích jsou popsána jednotlivá opotřebení u vybraných vzorků vč. dokumentace vybraných stop. Tato dokumentace byla pořízena pomocí stereolupy. Vzorky byly vždy 2 x 2 pouze tepelně zpracované (TZ => zušlechťené), nitridované a niklované.

Zdokumentované stopy

Získané stopy byly proměřeny v příčném směru, jelikož hloubku vytvořeného vtisku by bylo možno změřit jen obtížně. Délka vytvořeného vtisku může být značně ovlivněna případnou nepřesností při polohování vzorků proti sobě. Příčný rozměr by měl být ovlivněn jen minimálně. Stopy byly



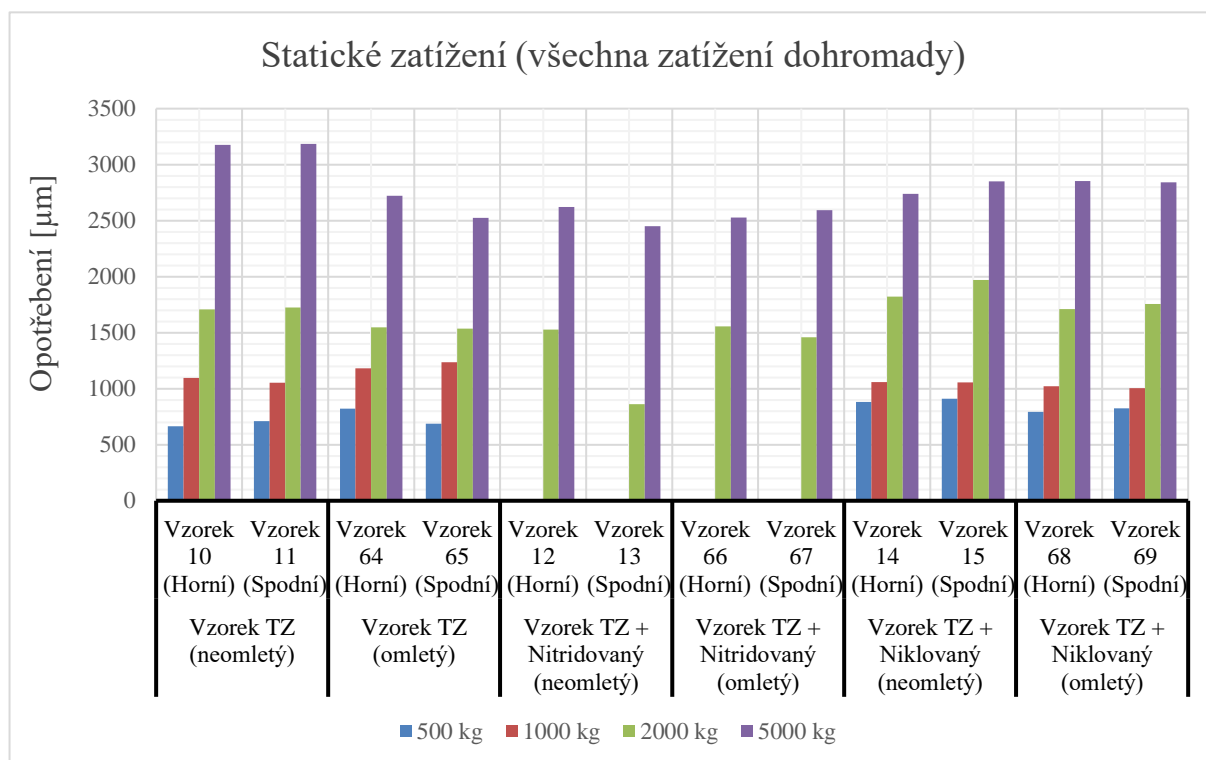
Obr. 110: Vzorek 11 2t 20x zvětšení, měření stopy

proměřeny v nejširším místě, viz obr. č. 110. Získané výsledky po zprůměrování a byly zaznamenány v tabulce č. 14.

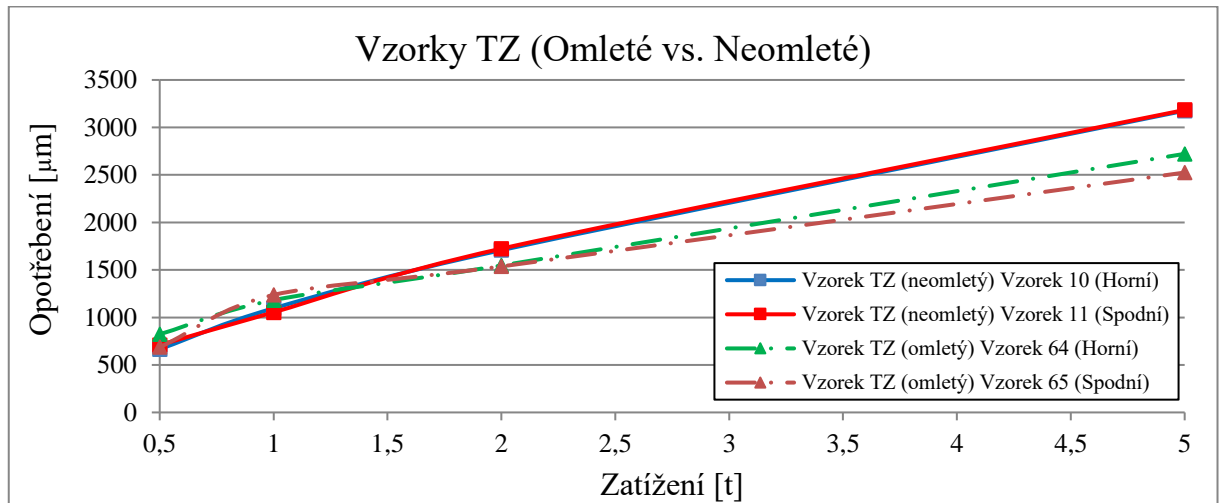
Tab. 14 : Změřené šířky stop po statické zkoušce pro sestavení Válec / Válec

Vzorky		Hodnoty opotřebení [μm]			
		500 kg	1000 kg	2000 kg	5000 kg
Vzorek TZ (neomletý)	Vzorek 10 (Horní)	666	1096	1708	3176
	Vzorek 11 (Spodní)	710	1054	1724	3184
Vzorek TZ (omletý)	Vzorek 64 (Horní)	823	1182	1547	2722
	Vzorek 65 (Spodní)	687	1237	1537	2525
Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	Vzorek 12 (Horní)	0	0	1527	2622
	Vzorek 13 (Spodní)	0	0	861	2450
Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	Vzorek 66 (Horní)	0	0	1556	2529
	Vzorek 67 (Spodní)	0	0	1460	2594
Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	Vzorek 14 (Horní)	882	1058	1821	2738
	Vzorek 15 (Spodní)	911	1056	1971	2852
Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	Vzorek 68 (Horní)	793	1021	1711	2853
	Vzorek 69 (Spodní)	824	1006	1756	2841

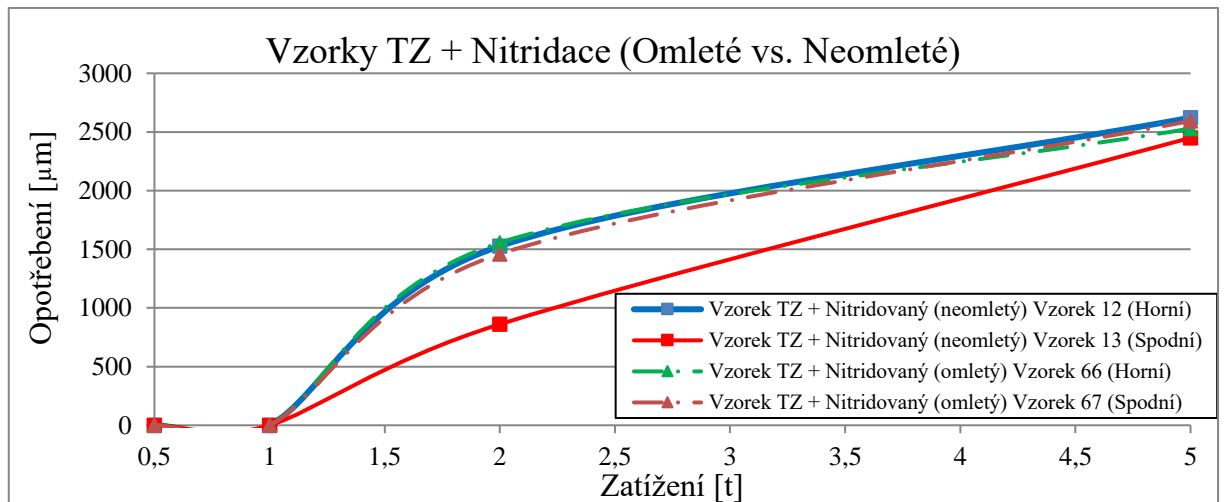
V případě nitridovaných vzorků nebylo možné přijatelně změřit rozměr vzniklé stopy po zatížení 0,5t a 1t. Toto bude dále dokumentováno na vybraných snímcích. Na následujících grafech (obr. č. 111-114) jsou zobrazeny průběhy, jak se vyvíjely rozměry poškození v závislosti na zvyšujícím se zatížení.



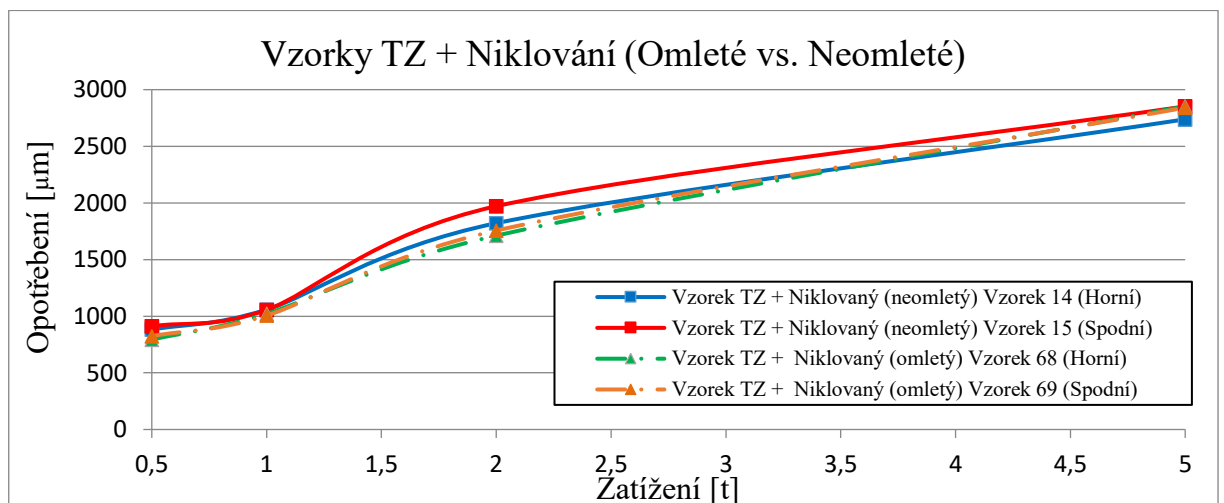
Obr. 111: Statické zatížení (všechna zatížení dohromady)



Obr. 112: Vzorky TS (Omleté vs. Neomleté)



Obr. 113: Vzorky TZ + Nitridace (Omleté vs. Neomleté)

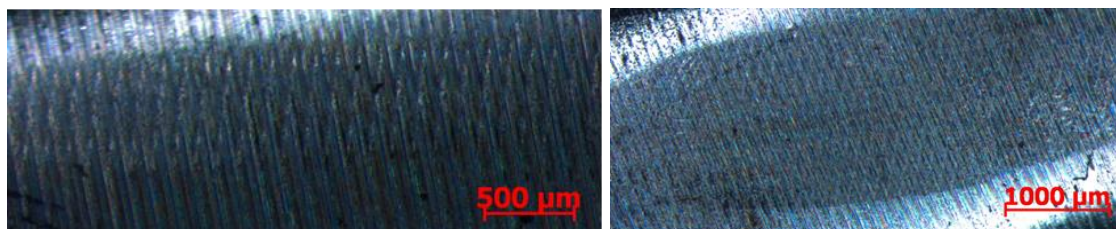


Obr. 114: Vzorky TZ + Niklování (Omleté vs. Neomleté)

Dokumentace vtisků

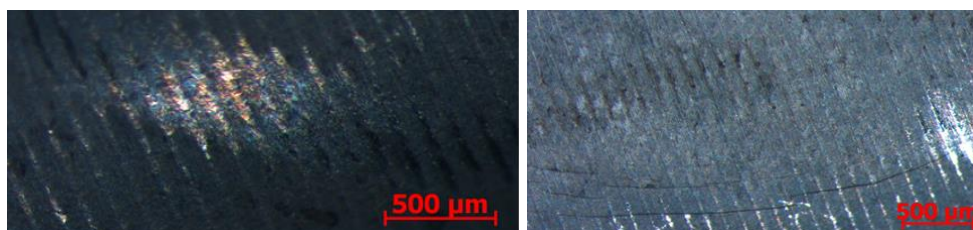
Na následujících obrázcích jsou zdokumentované stopy na vybraných vzorcích.

Vzorek pouze tepelně zpracovaný (TZ => zušlechťený):



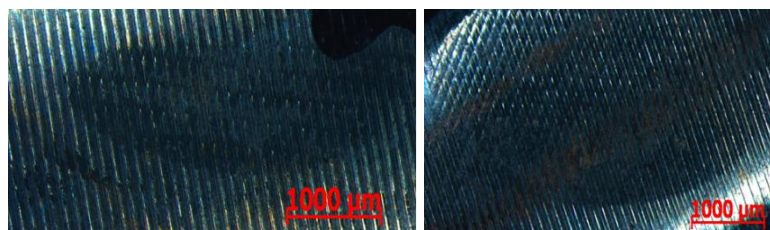
Obr. 115: Vzorek 11 – Pouze TZ - 0,5t zatížení, 30x zvětšení (vlevo); 2t zatížení, 20x zvětšení (vpravo)

Vzorek nitridovaný:



Obr. 116: Vzorek 66, nitridace 0,5t zatížení, 30x zvětšení (vlevo); 2t zatížení, 30x zvětšení, trhliny v okolí vtisku (vpravo)

Vzorek niklovaný:



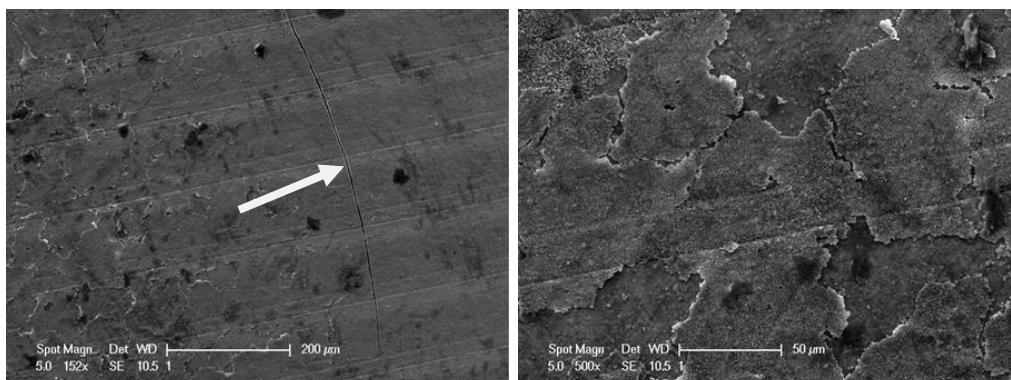
Obr. 117: Vzorek 15, niklování 0,5t zatížení, 20x zvětšení (vlevo); 2t zatížení, 20x zvětšení (vpravo)

Dokumentace povrchu pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu

Z předchozích testů vyplynulo, že z hlediska velikosti vytvořeného poškození vykazují nejlepší výsledky niklované a částečně i nitridované vzorky. Pokud bude přikročeno k jejich skutečnému nasazení, je nutno nejdříve prozkoumat nebezpečnou situaci, kdy dojde k částečné delaminaci povlaku a tím vytvoření velkého fragmentu povlaku. Tím může dojít k ucpání trysky, nebo poškození kluzného povrch ložiska a tím ke vzniku velmi nebezpečné a drahé havárie.

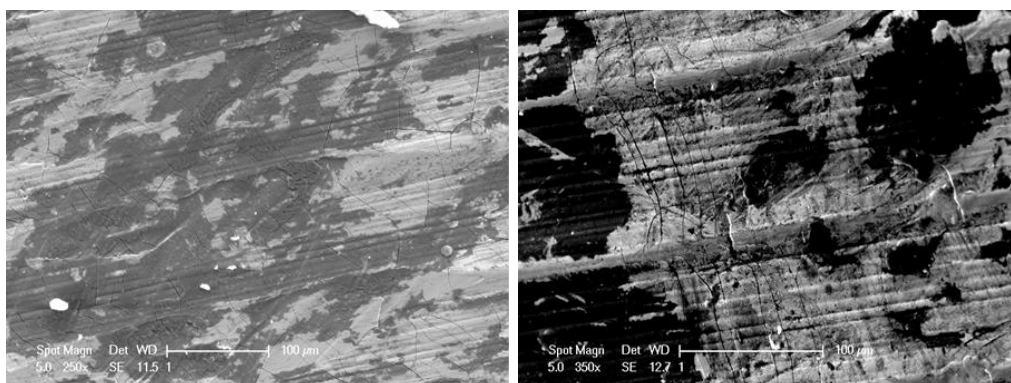
Zkoumání pevnosti povlaku byla provedena pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu Philips XL30ESEM.

Vzorek nitridovaný:



Obr. 118: Vzorek 67, nitridace, 1 t vtisk, zvětšení 152x – detail trhliny na okraji vtisku (vlevo); střed vtisku, detail delaminované vrstvy (vpravo)

Vzorek niklovaný:

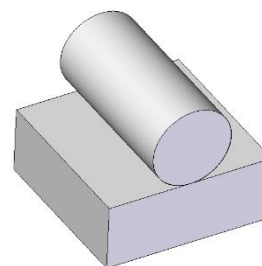


Obr. 119: Vzorek 15, niklování, 0,5 t vtisk, zvětšení 250x, detail vtisku. Patrné značné množství trhlín, delaminace není patrná (vlevo); 1 t vtisk, zvětšení 350x, detail okraje vtisku, nahnutí okraje při plastické deformaci (vpravo)

7.3.8.3 Sestava Válec na Plochu

Smyslem tohoto testu bylo docílení „čárového dotyku“, který se vytvoří uložení destičky oproti válečku. Výsledkem je rozložení zatížení na větší plochu.

Uspořádání testu bylo podle následujícího obr. 120. Váleček o průměru 12 mm o definované drsnosti byl zatlačen proti broušené destičce o velikosti 25 mm X 25 mm X 10 mm hydraulickým mechanismem při ekvivalentním zatížení odpovídající hmotnosti 500 kg, 1000 kg, 2000 kg a 5000 kg. Zatížení trvalo opět 10 vteřin a bylo měřeno tenzometrickým snímačem.



Obr. 120: Uspořádání testu – Váleček proti destičce

V následujících odstavcích jsou opět popsána jednotlivá opotřebení u vybraných vzorků vč. dokumentace vybraných stop. Vzorky byly vždy 2x pouze tepelně zpracované (TZ => zušlechťené), nitridované a niklované.

Zdokumentované stopy

Vybrané vzorky byly podrobeny stejnému procesu, jako v případě bodového styku = váleček + váleček. Přičemž příčná velikost vytvořených stop, viz obr. 121, byla vyznačena v následující tabulce. Do vzorku byl vytvořen otisk povrchových morfologií, ale k úplnému vtisku podle předpokladu nedošlo. Vzhledem ke geometrii vtisku byly použity stopy vytvořené v destičce. Ve válečku tyto stopy byly neměřitelné.

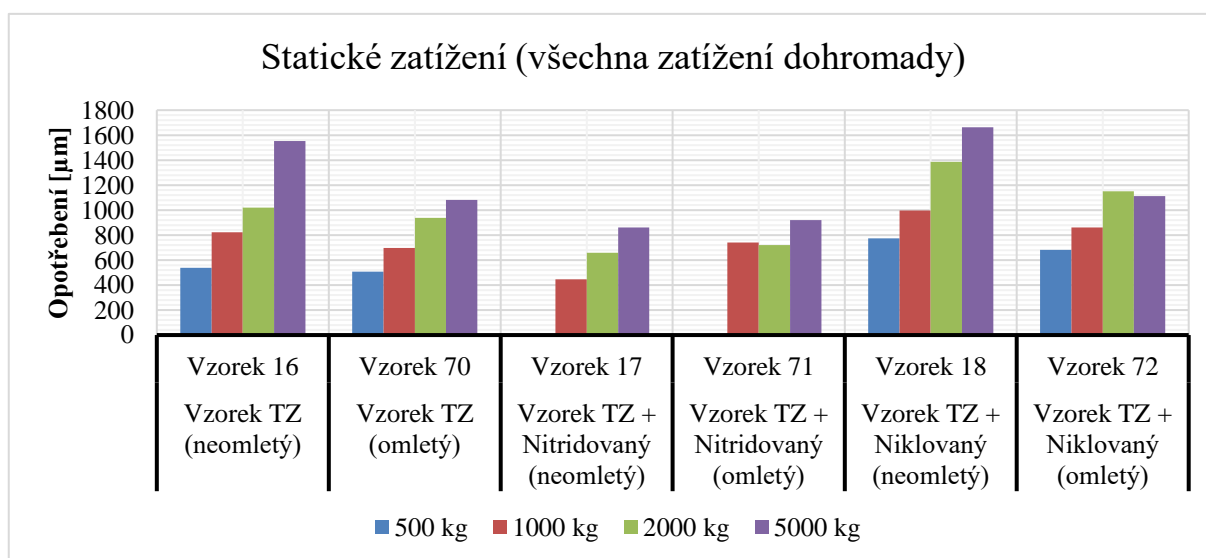


Obr. 121: Vzorek 18 destička, niklovaný, 20x zvětšení, 1t zatížení, měření

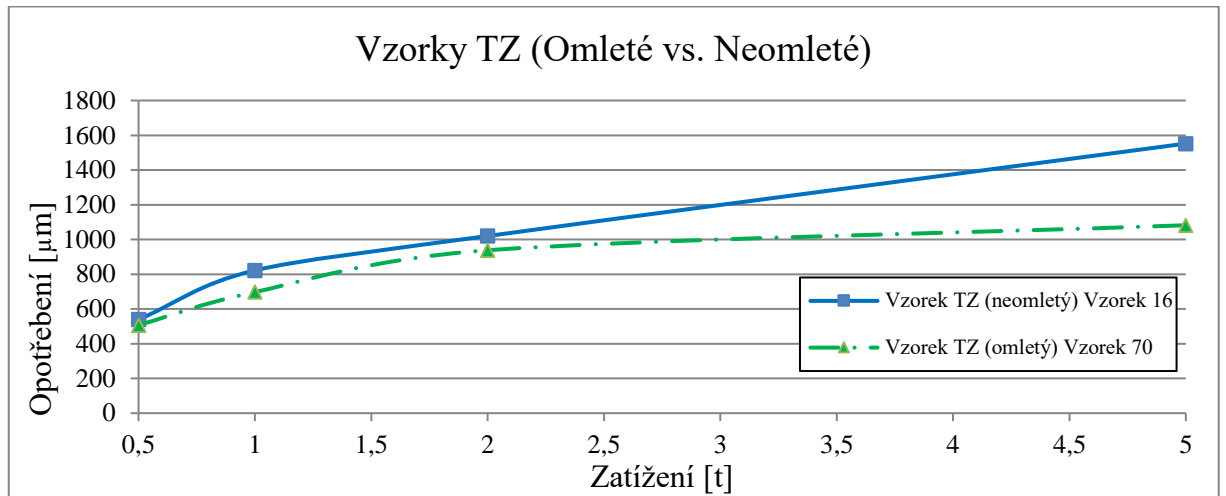
Tab. 15: Změřené šířky stop v μm po statické zkoušce pro sestavení Válec / Plocha

Vzorky		Hodnoty opotřebení [μm]			
		500 kg	1000 kg	2000 kg	5000 kg
Vzorek TZ (neomletý)	Vzorek 16	539	822	1020	1552
Vzorek TZ (omletý)	Vzorek 70	507	697	938	1082
Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	Vzorek 17	0	447	660	861
Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	Vzorek 71	0	742	720	921
Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	Vzorek 18	775	997	1386	1662
Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	Vzorek 72	681	862	1150	1112

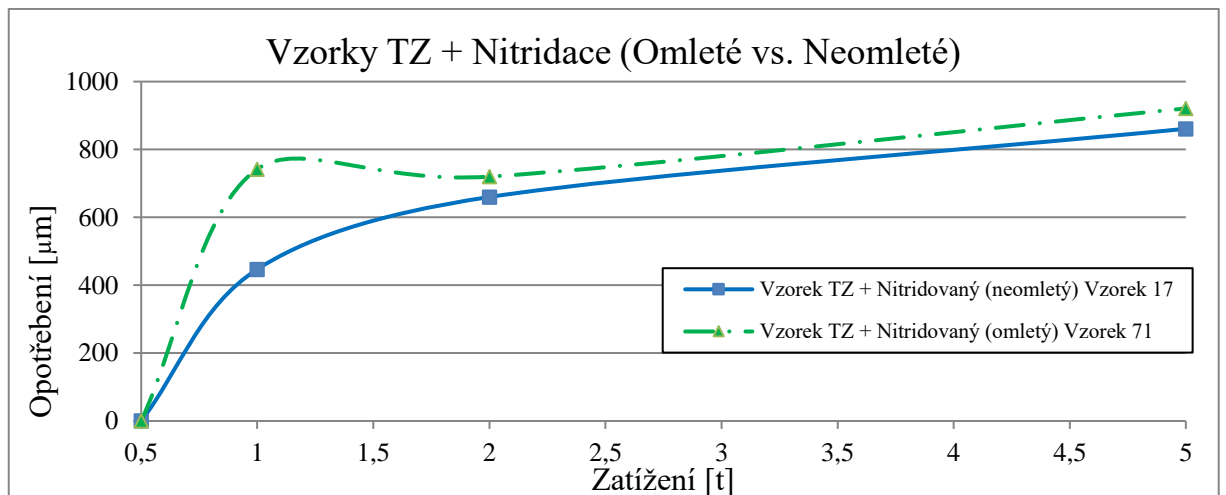
Na následujících grafech (obr. č. 122-125) jsou zobrazeny průběhy, jak se vyvíjely rozměry poškození v závislosti na zvyšujícím se zatížení.



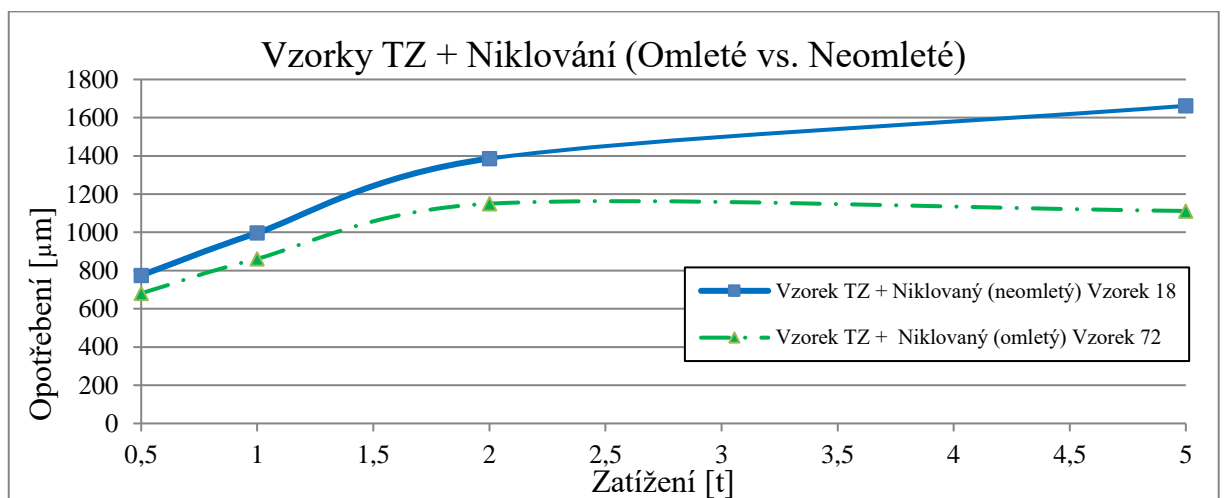
Obr. 122: Statické zatížení (všechna zatížení dohromady)



Obr. 123: Vzorky TZ (Omleté vs. Neomleté)



Obr. 124: Vzorky TZ + Nitridace (Omleté vs. Neomleté)

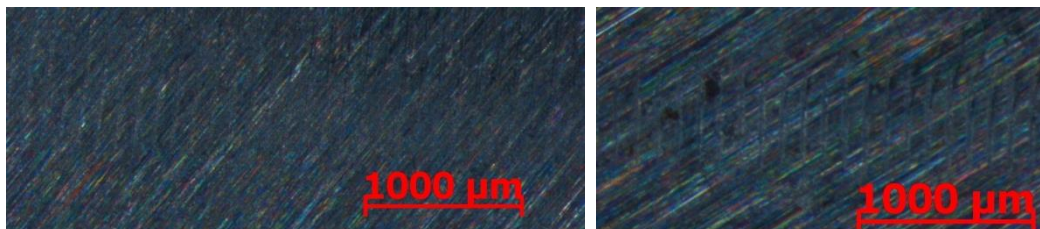


Obr. 125: Vzorky TZ + Niklování (Omleté vs. Neomleté)

Dokumentace vtisků

Na následujících obrázcích jsou zdokumentované stopy na vybraných vzorcích. Vybrané detaily byly prozkoumány ještě pomocí elektronového mikroskopu.

Vzorek pouze tepelně zpracovaný (TZ => zušlechťený):



Obr. 126: Vzorek 16 destička, pouze zušlechťený, 20x zvětšení, - Již viditelné poškození i při 0,5 t zatížení – (vlevo); 5 t zatížení (vpravo)

Vzorek nitridovaný:

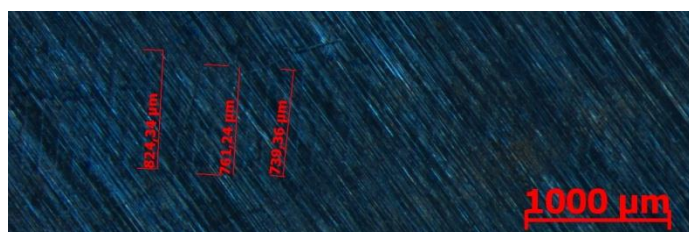


Obr. 127: Vzorek 17 destička, nitridace, 20x zvětšení, - Nerozpoznatelné žádné poškození při 0,5 t zatížení, (vlevo); začínající poškození při 2 t zatížení (vpravo)



Obr. 128: Vzorek 17 destička, nitridace, 20x zvětšení, 5 t zatížení, poškození

Vzorek niklovaný:



Obr. 129: Vzorek 18 destička, niklovaný, 20x zvětšení – Již viditelné poškození při 1t zatížení

Dokumentace povrchu pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu

Metodika a důvod pořízení snímků je shodný jako v předchozí kapitole. Z předchozích testů vyplynulo, že z hlediska velikosti vytvořeného poškození vykazují nejlepší výsledky opět niklované a v tomto sestavení (Válec/Plocha) i nitridované vzorky. Pokud bude přikročeno k

jejich skutečnému nasazení, je nutno opět nejdříve prozkoumat nebezpečnou situaci, kdy dojde k částečné delaminaci povlaku a tím vytvoření velkého fragmentu povlaku. Tím může dojít k ucpání trysky olejového hospodářství, nebo poškození kluzného povrch ložiska a tím ke vzniku velmi nebezpečné a drahé havárie.

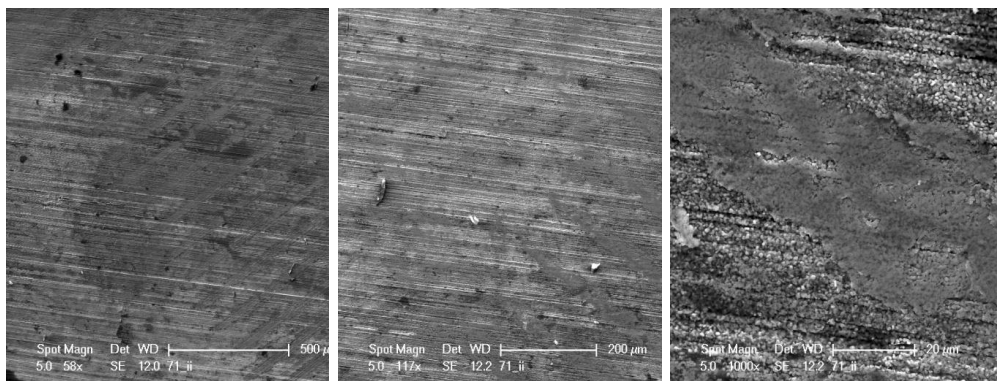
Zkoumání pevnosti povlaku byla provedena pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu Philips XL30ESEM.

Na níže uvedených snímkách byl zdokumentován nitridovaný vzorek 71 a niklovaný vzorek 72. Oproti předchozímu testování, kdy byly proti sobě přitisknuty 2 válečky (a jednalo se tedy zjednodušeně o bodové zatížení), se zde jednalo o zatížení čárové, kdy proti sobě byl přitisknut váleček s destičkou. To mělo za efekt, že síla byla rozložena na větší plochu.

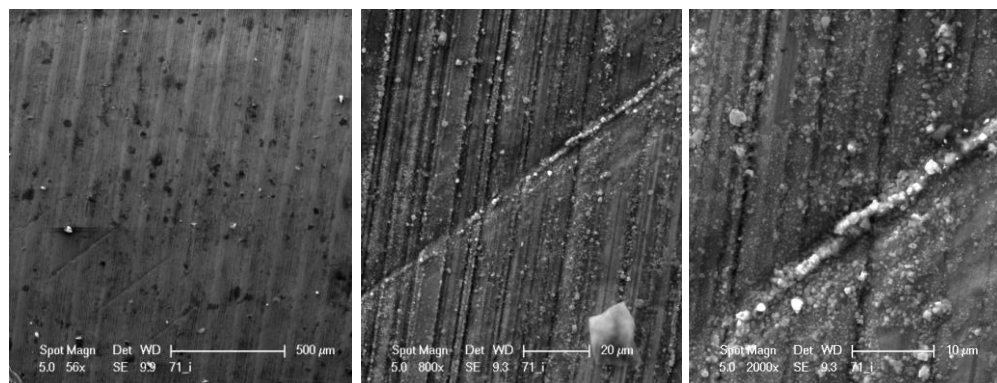
Na snímcích u nitridovaného vzorku nebyly objeveny na válečku, ani na destičce trhliny v nitridované vrstvě. Nitridovaná vrstva v tomto případě vydržela i vysoké zatížení (přetížení) 5t.

V případě niklovaných vzorků jsou zde patrné trhliny, které provázejí plastickou deformaci, která vznikne při vtisku válečku do destičky. Zároveň ale i toto již značné zatížení (5 t) evidentně nestačilo způsobit masivní destrukci, která byla pozorována na vzorcích váleček-váleček. Pro efektivní rozložení váhy však bude nutno zajistit dostatečně kvalitní uložení tak, aby čárový styk nepřešel do bodového styku.

Vzorek nitridovaný:

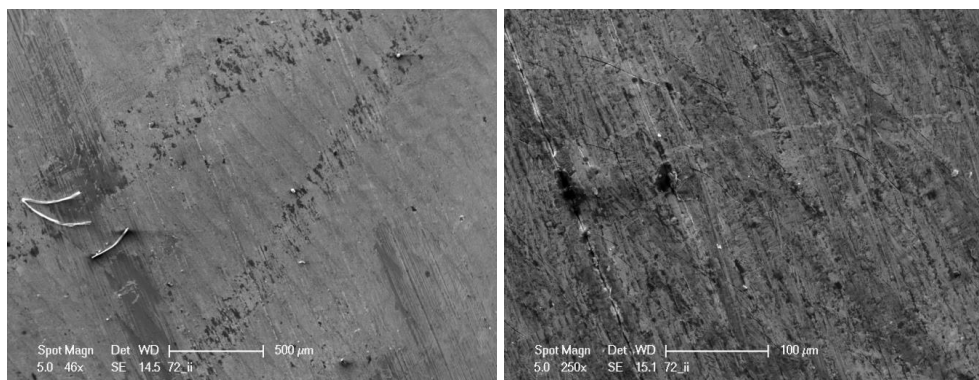


Obr. 130: Vzorek 71 - nitridovaný (destička) - 5t zatížení, 58x zvětšení (vlevo), 117x zvětšení (uprostřed), 1000x zvětšení (vpravo)

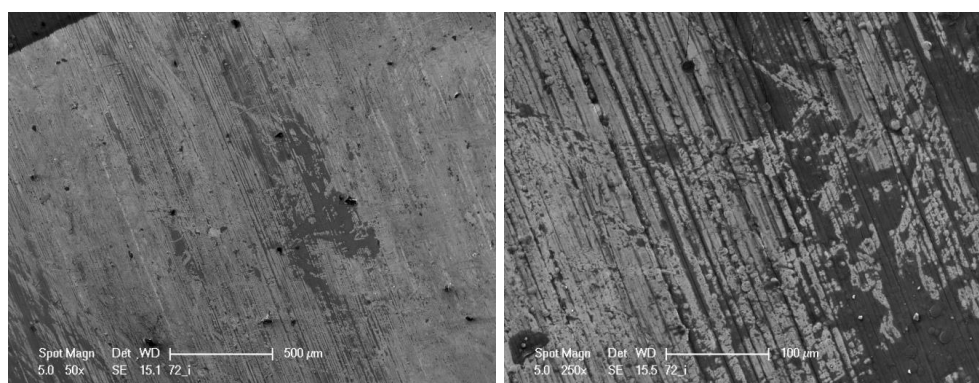


Obr. 131: Vzorek 71 - nitridovaný (váleček) - 5t zatížení, 56x zvětšení (vlevo), 800x zvětšení (uprostřed), 2000x zvětšení (vpravo)

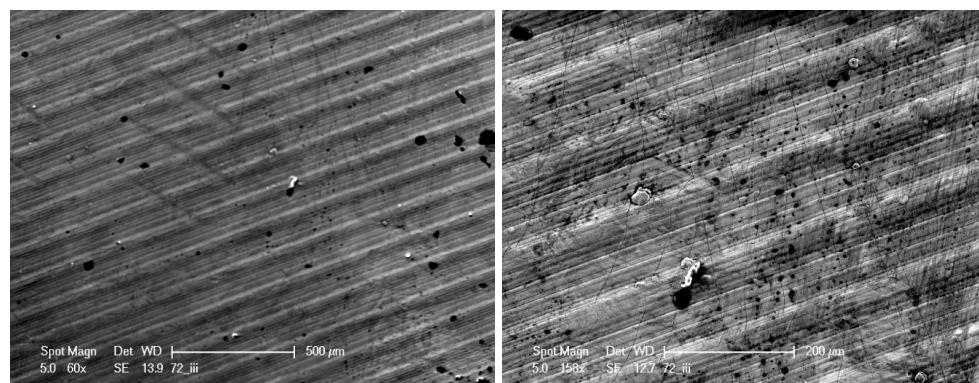
Vzorek niklovaný:



Obr. 132: Vzorek 72 - niklovaný (destička) - 5t zatížení, 46x zvětšení (vlevo), 250x zvětšení (vpravo)



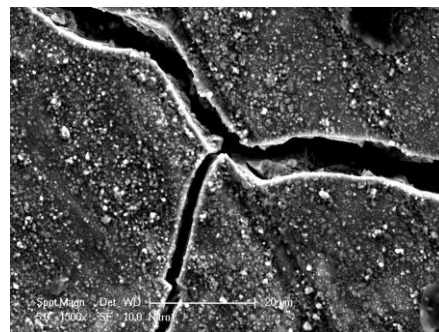
Obr. 133: Vzorek 72 - niklovaný (destička) - 2t zatížení, 50 x zvětšení (vlevo), 250 x zvětšení (vpravo)



Obr. 134: Vzorek 72 - niklovaný (váleček) - 2t zatížení, 60 x zvětšení (vlevo), 158 x zvětšení (vpravo)

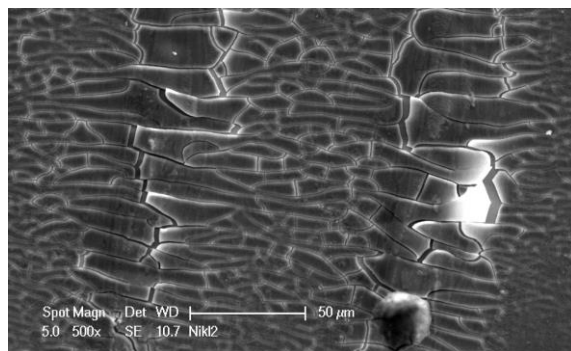
7.3.8.4 Diskuze nad výsledky

Mezi povrchy se při testování sestavy Válec / Válec projeví značné rozdíly. Na obr. 115 je zdokumentován vývoj poškození u povrchově neupraveného vzorku č. 11. Povrchové výstupky, které jsou pozůstatkem obrábění, jsou zachovány i při zatížení 5 t. Pokud budeme sledovat jaký je otisk protivzorku, tak zjistíme, že stopy otisku jsou sice měřitelné, ale vzájemné vtlačení těchto vzorků do sebe je poměrně nízké. Jde zřejmě o kombinaci faktorů povrchového zpevnění těchto výstupků a rozložení zatížení do plochy.



Obr. 135: Paprskovitá prasklina v nitridované vrstvě

Nitridovaná vrstva při statické zkoušce prokázala dobré výsledky při nižším zatížení, tj. do 1 t, kdy stopy nebyly po vtiscích prakticky měřitelné. Tato vrstva je velmi tvrdá a odolná, ale na druhé straně značně křehká. U vtisků se zatížením 1 t se již projeví trhliny viditelné pomocí stereolupy. Viz obr. 118. U vtisků se zatížením 2 a 5 t jsou patrné velké trhliny, které ohraničují vtisk. Tyto trhliny jsou vzájemně propojené a tvoří stupňovitý přechod mezi nezasaženým povlakem a relativně nezasaženým a kompaktním středem vtisku. Je patrné, že nitridační vrstva se fragmentuje na značně velké kusy. Jsou zde viditelné radiální trhliny a paprskovité trhliny, které byly viditelné i při zkoumání stereolupou při zvětšení 10x. Uprostřed vtisku je patrná snaha vrstvy se odloupnout, viz obr. 136. Tyto úlomky budou zřejmě v řádu desítek μm . Vzhledem k tloušťce olejového filmu ložiska, která je v rozmezí 25-40 μm , je tato hodnota již kritická. Aby bylo možno tuto vrstvu v reálném případě využít, bylo by nutné zaručit to, že se nebude jednat o bodové lokální zatížení, ale zatížení bude rozprostřeno na větší plochu. I za těchto podmínek ale hrozí nebezpečí, že tyto povlaky nebudou schopny vydržet náhlá přetížení, která se mohou vyskytnout zvláště v případě rozběhu, či nestandardního doběhu energetického zařízení.



Obr. 136: Detail nitridační vrstvy uvnitř vytvořené stopy

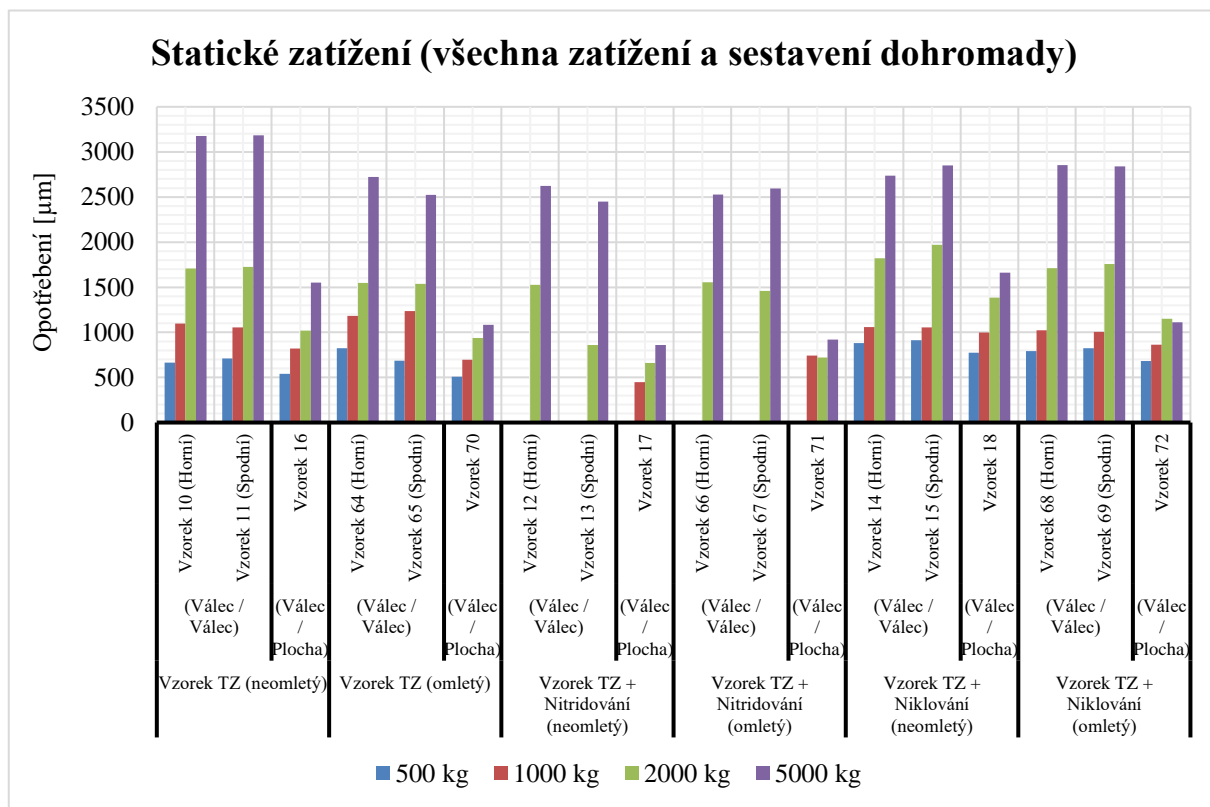
V případě niklovaných vzorků, je patrná relativně malá tvrdost a vysoká plasticita vrstvy oproti vzorkům nitridovaným. Šířky vytvořených stop mají podobné rozměry v porovnání se stopami vytvořenými v povrchově neupravených vzorcích, které byly pouze zušlechťené.

Na obr. 119 jsou zdokumentovány vtisky v niklovaných vzorcích a je znázorněna síť trhlín, na které je povlak fragmentován. Na žádném z těchto snímků ale není patrné, že by se tyto měly tendenci odlupovat.

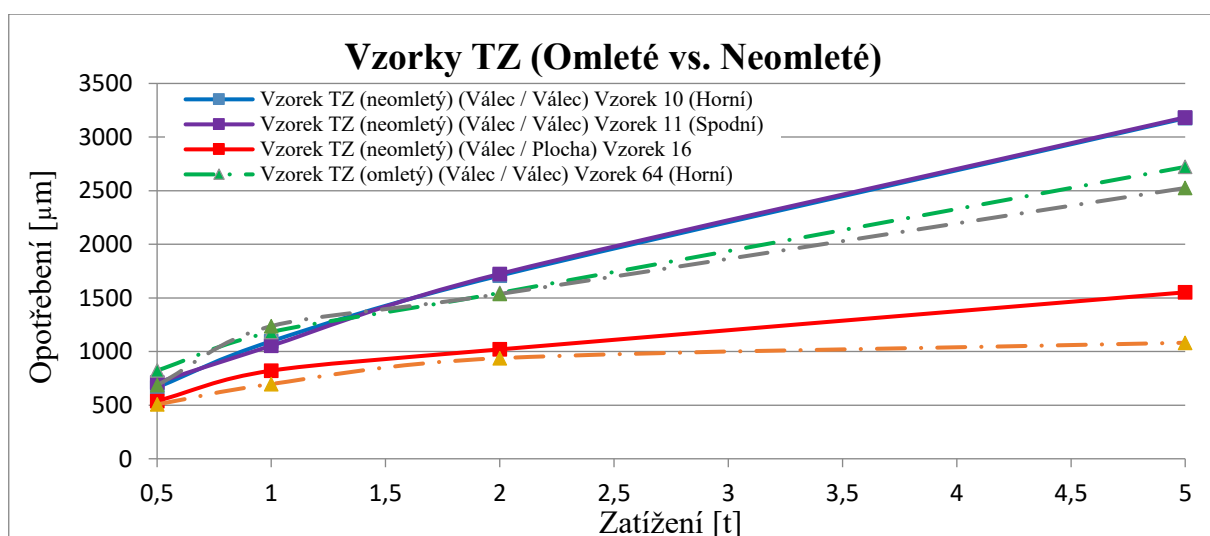
Z níže uvedených grafů je patrné, že statické opotřebení při sestavě Válec / Plocha bylo řádově nižší ve všech případech, přičemž nitridovaný povrch má při nízkém zatížení výhodu, kdy se větší poškození (bez trhlín) projeví až při značně vysokém zatížení (2 t). V následujících detailních grafech je nadále patrný i určitý přínos omílání, kdy je povrch po této technologii

zbažený „vrcholku“ drsnosti. Lze proto napětí roznést na větší plochu a v případě statického zatížení pak dojde k menšímu opotřebení.

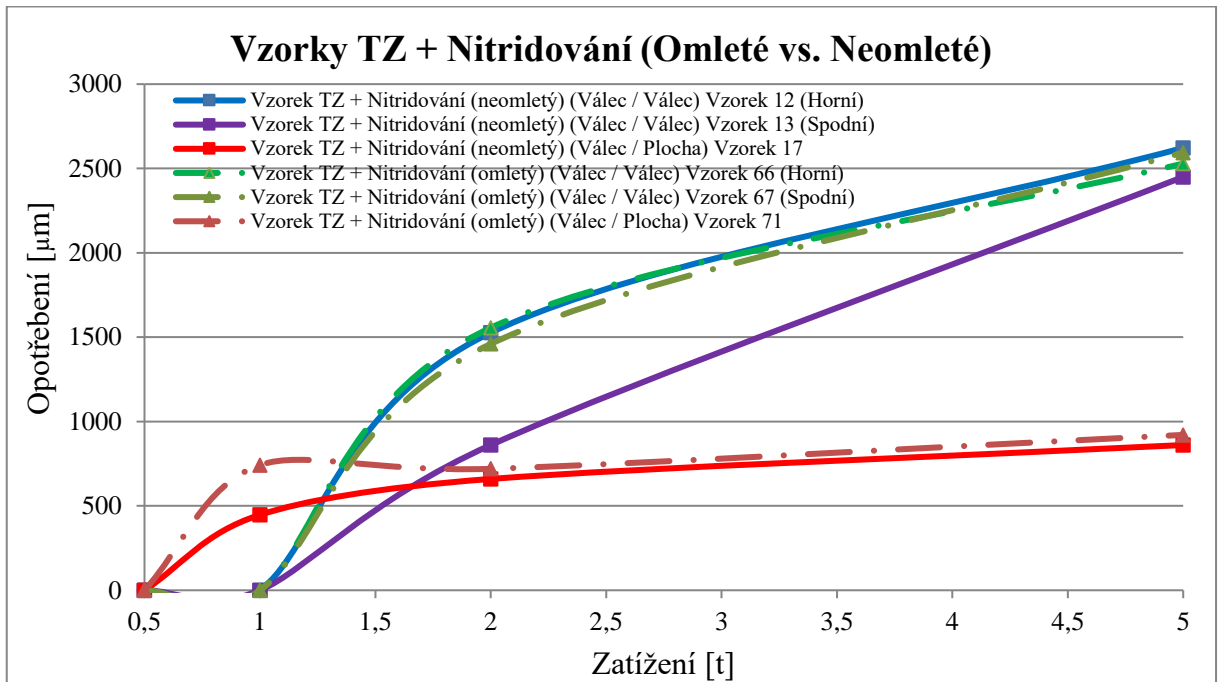
Dále lze konstatovat, že niklované vzorky, co se týká rozměrů vytvořeného poškození, jsou při statickém zatížení velmi podobné poškození vzorkům bez povrchové úpravy. Přínos tohoto typu povlaku se projeví, pokud bude zároveň působit i vibrační zatížení.



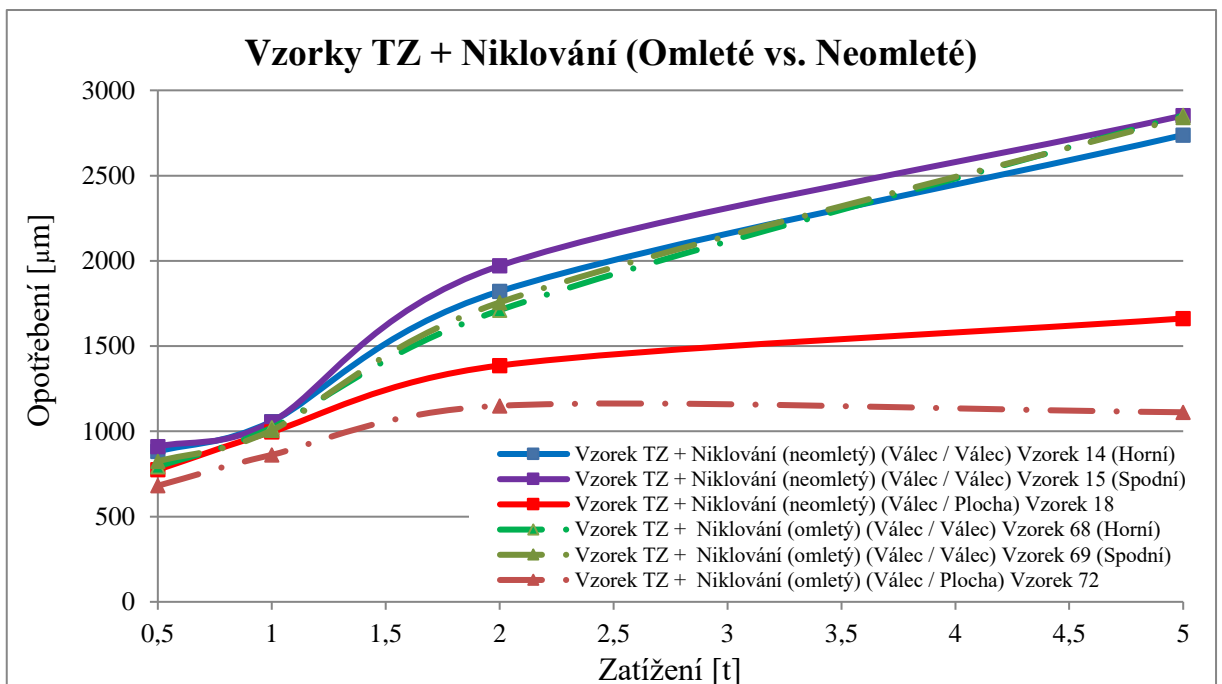
Obr. 137: Statické zatížení (všechna zatížení a sestavení dohromady)



Obr. 138: Vzorky TZ (Omleté vs. Neomleté)



Obr. 139: Vzorky TZ + Nitridování (Omleté vs. Neomleté)



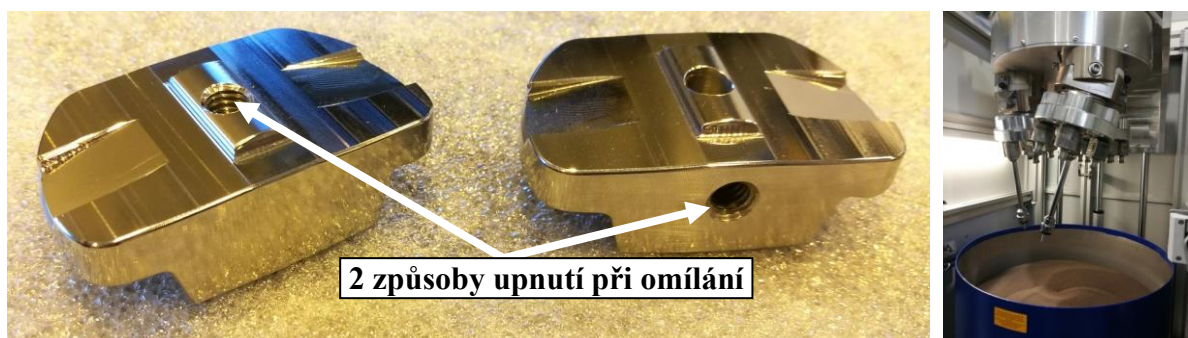
Obr. 140: Vzorky TZ + Niklování (Omleté vs. Neomleté)

7.4 Experimentální ověření tribologických vlastností reálných vahadel

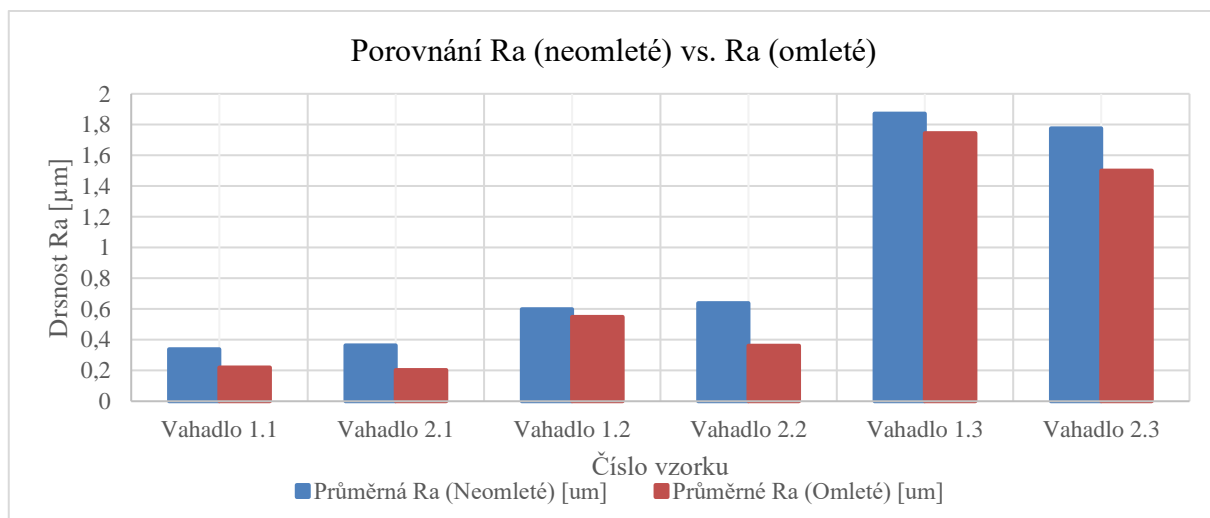
Vzhledem k tomu, že niklované povrchy obstáli ze všech variant povrchových úprav nejlépe, bylo přistoupeno k finálnímu experimentálnímu ověření tribologických vlastností, u již reálných vahadel povrchově ošetřených právě niklováním. Díky k tvarové složitosti vahadla nebylo uvažováno o frekvenčním testu a byl proveden pouze test statický.

Vahadla byla vyrobena v sedmi variantách:

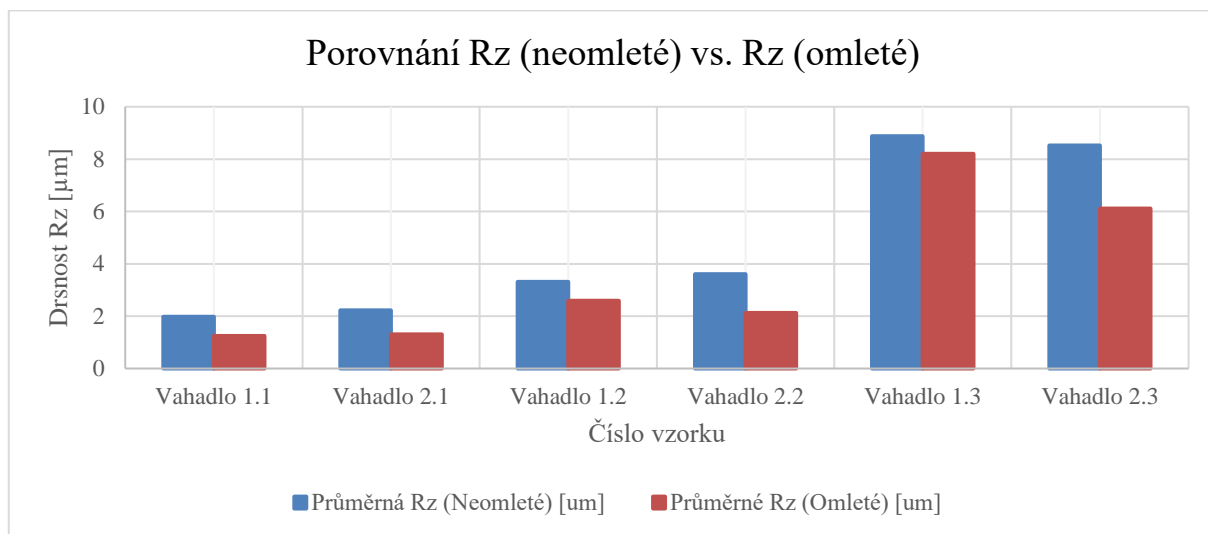
- Niklovaná + Omletá
 - a) Vahadlo bylo při omílání upnuto z boku (viz. obr. 141)
 - i. Vahadlo 1.1 (Drsnost 1 – ekvivalent $\sim f_1$ z předchozích kapitol)
 - ii. Vahadlo 1.2 (Drsnost 2 – ekvivalent $\sim f_2$ z předchozích kapitol)
 - iii. Vahadlo 1.3 (Drsnost 3 – ekvivalent $\sim f_3$ z předchozích kapitol)
 - b) Vahadlo bylo při omílání upnuto ze shora (viz. obr. 141)
 - i. Vahadlo 2.1 (Drsnost 1 – ekvivalent $\sim f_1$ z předchozích kapitol)
 - ii. Vahadlo 2.2 (Drsnost 2 – ekvivalent $\sim f_2$ z předchozích kapitol)
 - iii. Vahadlo 2.3 (Drsnost 3 – ekvivalent $\sim f_3$ z předchozích kapitol)
- Niklovaná + Neomletá
 - a) Vahadlo 3.1 (Drsnost – ekvivalent f_2 z předchozích kapitol)



Obr. 141: 2 možné způsoby upnutí vahadel při omílání (vlevo); Proces omílání vahadel (vpravo)



Obr. 142: Porovnání drsnosti Ra (neomleté) vs. Ra (omleté)



Obr. 143: Porovnání drsností Rz (neomleté) vs. Rz (omleté)



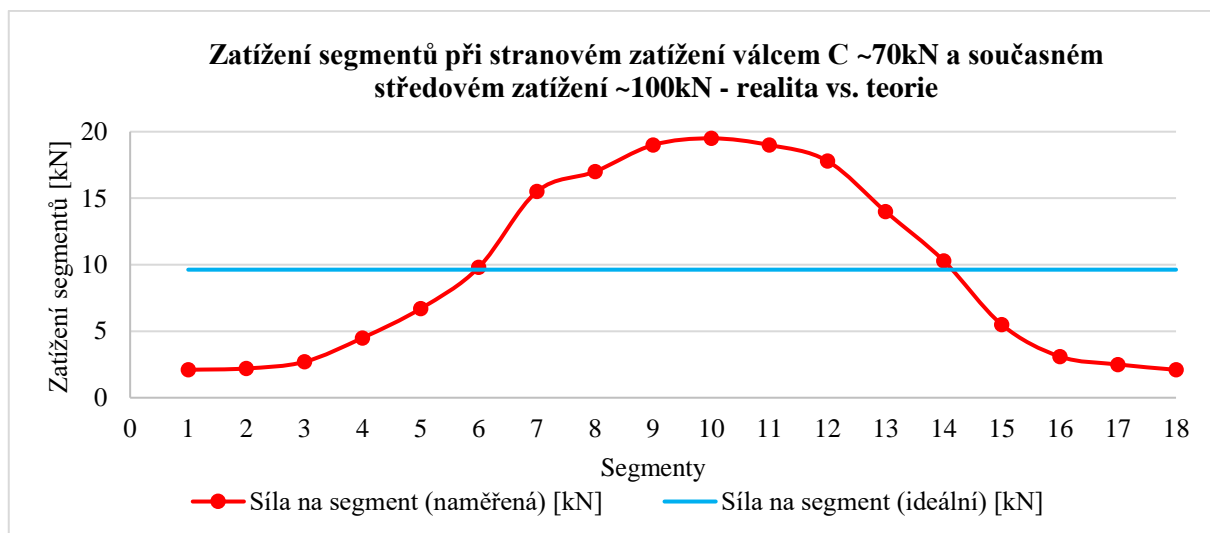
Obr. 144: Vahadla pro omílání. Vpravo detail na vahadlo 2.1.



Obr. 145: Vahadlo po niklování

Cílem bylo zjistit, zda nedošlo k rozvoji poškození povrchové vrstvy. U prvního vahadla 1.1 je vyznačena oblast A–B, které byly dokumentovány na řádkovacím elektronovém mikroskopu. U všech vahadel byly tyto oblasti značení zachovány, tj. válcová kontaktní oblast má značení „A“, rovná kontaktní oblast má označení B.

Hodnoty pro zatížení byly vypočteny na základě výsledků z kapitoly 7.2.2. Pro vzorový příklad bylo zvoleno měření rozložení sil u 18 segmentového ložiska při stranovém zatížení válcem C ~70kN a současném středovém zatížení ~100 kN.



Obr. 146:Zatížení segmentů při stranovém zatížení válcem C ~70kN a středovém zatížení ~100kN – realita vs. teorie

Tab. 16: Rozložení sil u 18-ti seg. ložiska při stranovém zatížení válcem C ~70kN a současném středovém zatížení ~100kN

Číslo segmentu	Síla na segment (naměřená) [kN]	Síla na segment (ideální) [kN]	Ochylka naměřené vs. realita [kN]	Ochylka naměřené vs. realita [%]
1	2,1	9,63	-7,53	-78 %
2	2,2	9,63	-7,43	-77 %
3	2,7	9,63	-6,93	-72 %
4	4,5	9,63	-5,13	-53 %
5	6,7	9,63	-2,93	-30 %
6	9,8	9,63	0,17	2 %
7	15,5	9,63	5,87	61 %
8	17	9,63	7,37	77 %
9	19	9,63	9,37	97 %
10	19,5	9,63	9,87	103 %
11	19	9,63	9,37	97 %
12	17,8	9,63	8,17	85 %
13	14	9,63	4,37	45 %
14	10,3	9,63	0,67	7 %
15	5,5	9,63	-4,13	-43 %
16	3,1	9,63	-6,53	-68 %
17	2,5	9,63	-7,13	-74 %
18	2,1	9,63	-7,53	-78 %
Celkem	173,3	173,3	Max. odchylka:	103 %

Pokud se bude brát odchylka 103% jako nejhorší možný případ, tak v případě celkového zatížení 130 kN u 10-ti segmentového ložiska bude maximální zatížení na vahadlo 26,33 kN=>~3 t. Jedná se o reálné hodnoty u této testované velikosti vahadla, a čím je zvolen

menší počet segmentů, tím vyšší síla bude vycházet na vahadlo. Počet 10 segmentů se zdá být dostatečně konzervativní vzhledem k tomu, že rozložení sil u 10 segmentového ložiska bude ze zkušeností příznivější a maximální odchylka bude $<103\%$. Těmito parametry byla zatěžována testovaná vahadla.

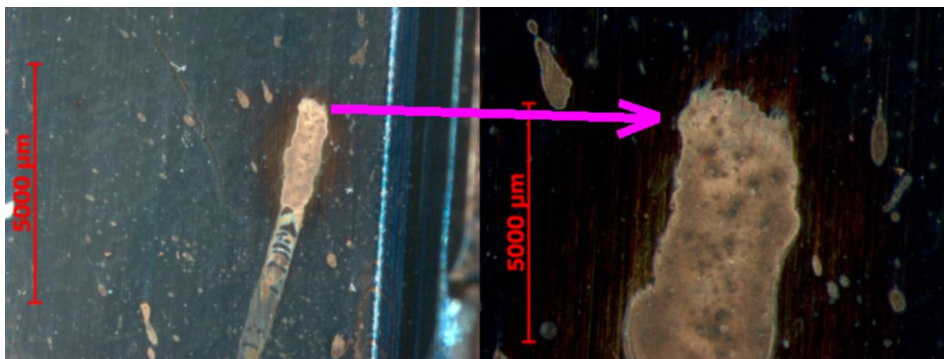


Obr. 147: Ustavení vahadla v lisu

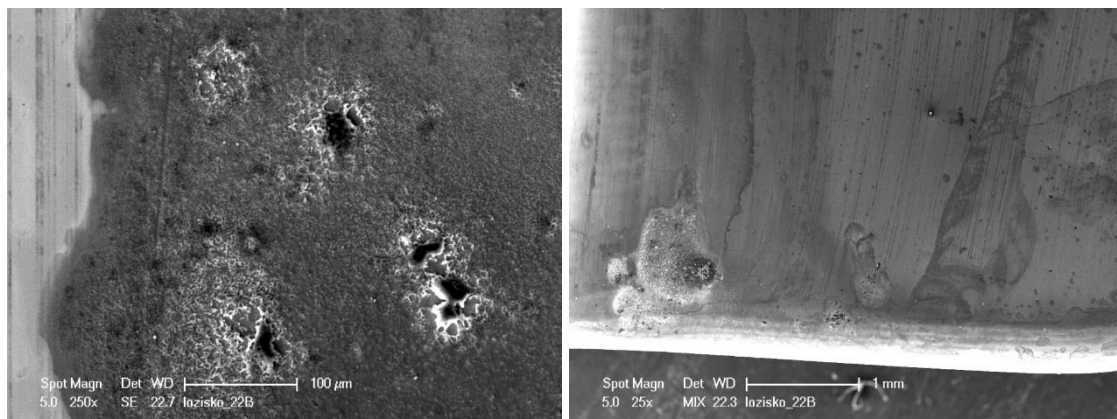
Na obr.147 je vidět ustavení vahadla v lisu. Vahadlo bylo z obou stran podepřeno na kalených válčích. Vzhledem k tomu, že vahadlo mělo na jedné straně válcovou kontaktní oblast („A“) a na druhé rovinou kontaktní oblast („B“), mohly být staticky otestovány obě kontaktní dvojice – Válec/Plocha a Válec/Válec.

Po zatížení byla u všech vahadel provedena vizuální prohlídka stavu povrchu v oblasti A-B. To bylo provedeno pomocí stereolupy NIKON. Následně bylo každé vahadlo v oblasti A-B zkontrolováno i na řádkovacím elektronovém mikroskopu.

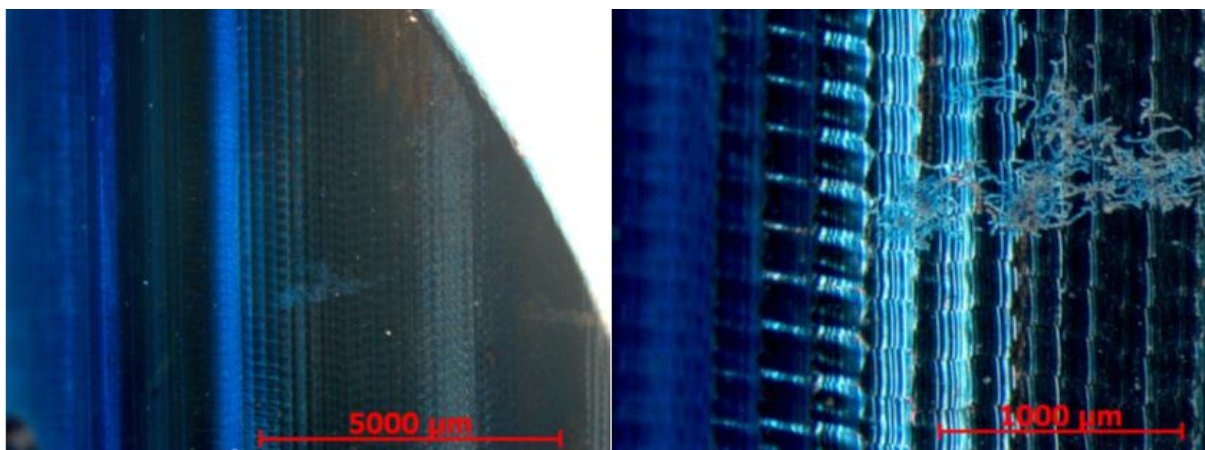
U většiny vahadel byly zjištěny drobné defekty, ale následná analýza povrchu s využitím řádkovacího elektronového mikroskopu prokázala, že ve sledovaných defektech není výrazně narušena integrita povrchu. Jednalo se spíše o povrchové reflexní vrstvy. Na následujících snímcích jsou zachyceny větší defekty u vybraných vahadel:



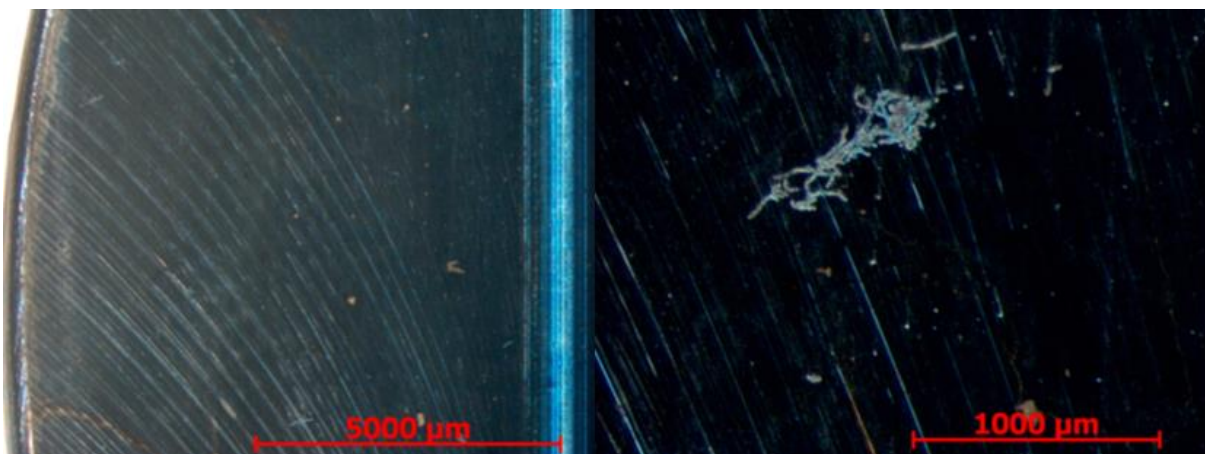
Obr. 148: Vahadlo 22 – oblast B. Jak zachytily následné snímky z řádkovacího elektronového mikroskopu, i tento zcela prokazatelný defekt z hlediska vizuálního pozorování nelze klasifikovat jako poškození povrchu, ale pouze jako nečistoty na povrchu, které nebylo možné odstranit ani důkladným očištěním



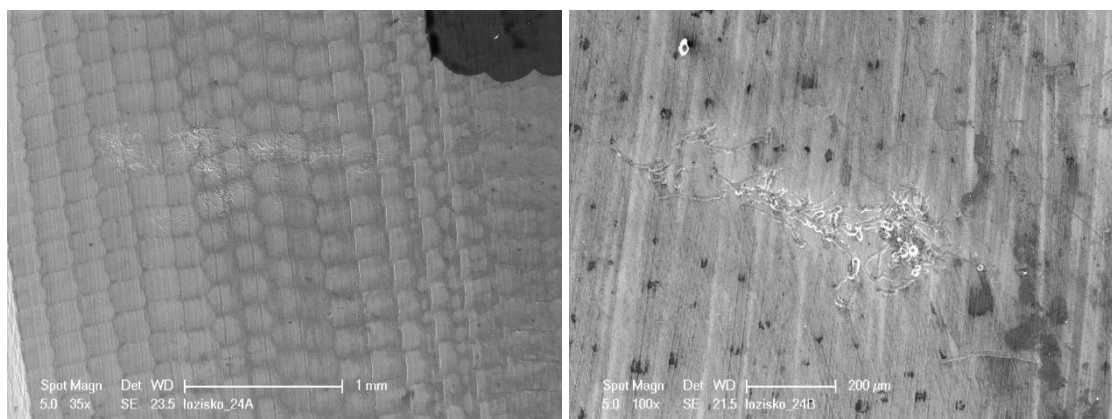
Obr. 149: Vahadlo 22 – oblast B – snímek potvrzující, že domnělé trhliny jsou pouze povrchové tenké filmy nečistot a nejedná se o defekty, pouze o nečistoty.



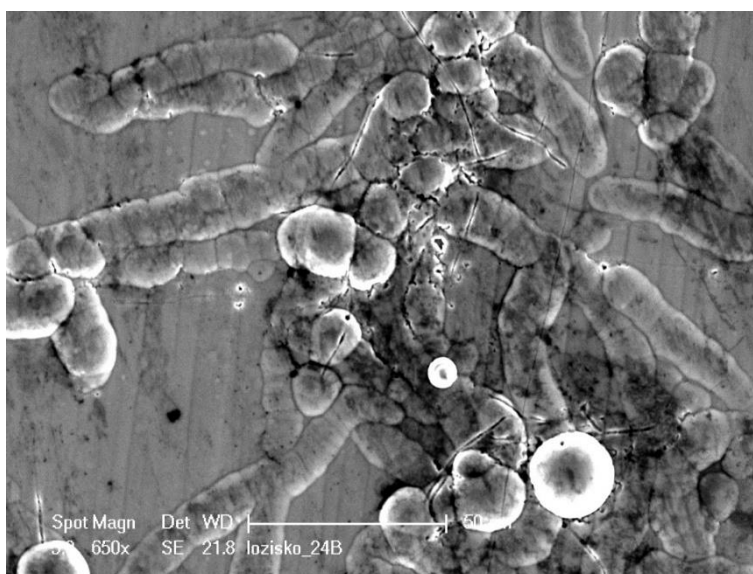
Obr. 150: Vahadlo 31 – oblast A. Tomuto vahadlu byla věnována větší pozornost. Na niklovaném povrchu byly zjištěny defekty, které nesouvisí se statickým zatížením, ale jejich původ je v nehomogenitě povrchu – viz snímky z řádkovacího elektronového mikroskopu.



Obr. 151: Vahadlo 31 – oblast B, v této oblasti byly při vizuální zkoušce zjištěny defekty, které souvisí s technologií předchozí povrchové úpravy, nikoliv se statickým zatížením.



Obr. 152: Vahadlo 31 – oblast A – povrchové defekty, které jsou spojeny s vytvářením vrstvy, nikoliv se statickým zatížením povrchu. (vlevo); Vahadlo 31 – oblast B – povrchové defekty stejného charakteru jako v oblasti A byly zachyceny také na rovném povrchu vahadla (vpravo)



Obr. 153: Vahadlo 31 – oblast B – povrchové defekty – detailní snímek dokumentuje jak povrchové nerovnosti, tak i trhliny způsobené přítomností těchto defektů.

7.4.1 Diskuze nad výsledky

Jak vyplývá ze sledovaných vahadel, nelze na základě pouze vizuální prohlídky (ač při zvětšení pomocí stereolupy) zjistit skutečný stav povrchu. Ve většině případů, kdy byly vizuální prohlídkou pomocí stereolupy zjištěny defekty, byly následným pozorováním pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu tyto defekty vyvráceny. Na povrchu vahadel se vyskytovaly pouze nečistoty, které při vizuálním pozorování vypadaly jako defekty. V některých případech se jednalo o defekty povrchu, jejichž příčina spočívala v technologii povrchové úpravy. Tyto defekty byly ve větší míře viditelné u vahadla, které nebylo ošetřeno omíláním.

Na žádném vahadle (o jakékoliv drsnosti povrchu) nebyly zjištěny defekty po statickém zatěžování.

7.5 Ověření funkčnosti prototypů ložisek v experimentálních zařízeních schopných nasimulovat reálný provoz

V předchozích kapitolách byly vždy otestovány vybrané (jednotlivé) aspekty vyvíjeného ložiska, tj. různé geometrie vahadel (tvar), různá povrchová zpevnění, drsnost funkčních ploch a z toho vyplývající trvanlivost funkčních ploch vahadel. Tyto testy byly velice důležité k nalezení co možná nejlepší varianty vahadel ložiska.

K ověření celkové funkčnosti ložiska je nicméně zapotřebí ložisko otestovat v experimentálním zařízení, které je schopné nasimulovat reálný provoz.

Bylo vyrobeno několik prototypů, které byly postupně otestovány u dvou významných českých dodavatelů energetických zařízení: Doosan Škoda Power a Howden ČKD Compressors.

U všech prototypů ložisek byla použita vahadla využívající kontaktní dvojici Válec/Plocha po obou stranách. Toto řešení bylo vybráno z důvodu nižších kontaktních Hertzových tlaků a tím pádem i vyšší životnosti (ověřeno v kapitolách 7.3.7 a 7.3.8), i když oproti jiným řešením měřených v kapitole 7.2.2. vykazovalo horší výsledky při vychýlení. I tak bylo toto řešení o řád lepší než jiná konkurenční řešení a splňuje požadavky zadané na začátku. Funkční povrch vahadel byl obroben tak, aby splňoval parametry drsnosti posuvu f_2 . Vahadla byla dále povrchově zpevněna bezproudým niklováním. Technologie omílání použita nebyla z důvodu zanedbatelného vlivu na trvanlivost.

Na tomto místě je třeba podotknout, že ač se vybrané jednotlivé parametry (tvar, povrch. zpevnění atd.) v jednotlivých dílčích experimentech nejevily jako optimálních, tak při komplexním pohledu již ano (vždy zdůvodněno v diskuzi na konci kapitoly). A to je také hlavní myšlenka technologičnosti konstrukce => pouze synergií všech inženýrských oborů může vzniknout optimální produkt a v tomto výzkumu se to jen potvrdilo.

Všechny experimenty popsané v následujících kapitolách byly krátkodobého charakteru. Z pohledu testování trvanlivosti vahadel tedy neměly dostatečnou odpovídající hodnotu. To se následně potvrdilo po demontáži vahadel z jednotlivých prototypů, kdy vahadla vykazovala nulové opotřebení. Tyto experimenty si však nekladly za cíl ověřit trvanlivost vahadel, ale komplexně ověřit celkovou funkčnost nově vyvinutého typu ložiska.

Prototypy ložisek byly otestovány na těchto experimentálních zařízeních⁹:

- Experimentální turbína DOOSAN Škoda Power TG 10.
- Experimentální převodovkový stand postavený ve spolupráci Howden ČKD Compressors a GTW BEARINGS.
- Experimentální kompresorové zařízení Darina IV Howden ČKD Compressors se sídlem v NTC při ZČU.

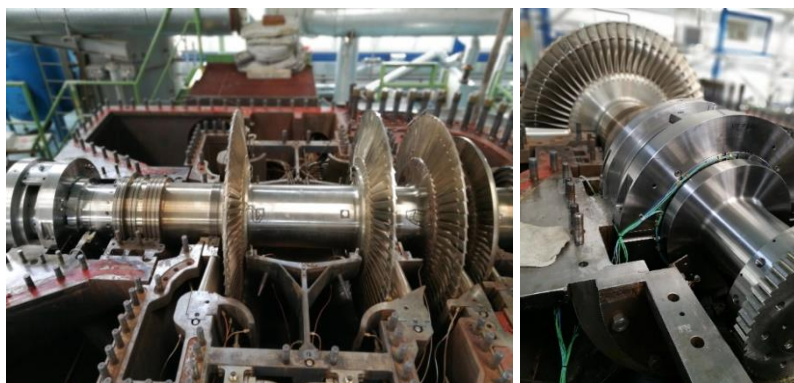
⁹ Experimentální zařízení jsou seřazeny tak, jak šli testy chronologicky za sebou.

7.5.1 Experimentální turbína DOOSAN Škoda Power TG 10

Experimentální turbína TG 10 umístěná v prostorách R&D centra DOOSAN Škoda Power, je zařízení, na kterém se primárně testuje geometrie lopatek turbíny. Je to v podstatě jednostupňová turbína, schopná otáčet se rychlostí více jak $10\,000\text{ min}^{-1}$. Aby turbína byla pod určitým zatížením, je brzděna hydraulickou brzdou zastupující generátor. Na jedné straně je turbína osazena kombinovaným kluzným ložiskem a na druhé straně radiálním ložiskem s naklápěcími segmenty. Takto nastavená turbína je schopna simulovat reálné podmínky zatížení, které na ložisko během chodu působí. Z tohoto důvodu bylo toto zařízení vybráno pro komplexní ověření funkčnosti.

Pro ověření funkčnosti samo-vyrovnávacího mechanismu v ložisku je zde možnost sledování těchto parametrů:

- Teploty a ztrátový výkon ložisek.
- „Naplavání“ rotoru v ložisku.
- Měření statické síly působící na axiální ložisko.



Obr. 154: Experimentální turbína DOOSAN Škoda Power TG 1: Celek (vlevo); Detail na kombinované ložisko (vpravo)

Pro testování v experimentální turbíně TG10 bylo použito 8-segmentové axiální ložisko se segmenty na roztečné kružnici 334mm, které bylo vsazeno do tělesa kombinovaného ložiska po obou stranách tak, aby bylo možné zachytit axiální složku síly z obou stran – tzv. aktivní a neaktivní strany turbíny.

Tato konstrukce prototypu zcela naplňovala požadavek modularity řešení kombinovaného ložiska.

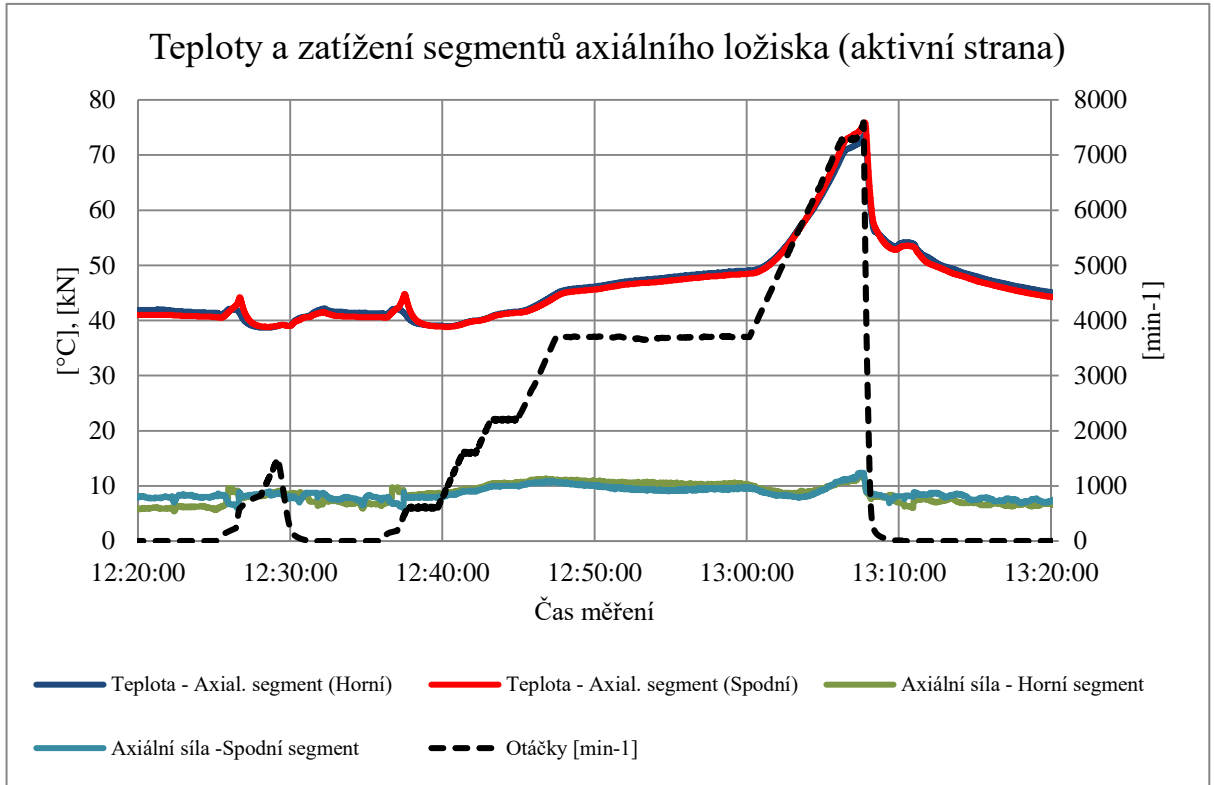
Z níže přiloženého grafu je patrné, že samo-vyrovnávací mechanismus v ložisku pracoval velice dobře i při plném zatížení => měřené teploty ve spodním a horním segmentu se téměř nelišily.

V absolutním měřítku se teploty obou segmentů pohybovaly silně pod možným maximem, které se nachází okolo 115 °C .



Obr. 155: Kombinované kluzné ložisko pro TG10 – řez

Vzhledem k tomu, že ložisko bylo osazeno i čidly pro měření velikosti axiální síly, bylo možné funkčnost mechanismu změřit i z pohledu rozložení sil působící na horní a spodní segment. I v tomto případě byl rozdíl nepatrný.



Obr. 156: Teploty a zatížení segmentů axiálního ložiska (aktivní strana)

7.5.2 Experimentální převodkový stand Howden ČKD Compressors a GTW BEARINGS

Zdroj: [60] [61]

Vzhledem ke kontinuálnímu tlaku ze strany zákazníků Howden ČKD Compressors na zvyšování měrných parametrů turbokompresorů bylo nutné přehodnotit návrhové limity jednotlivých subsystémů kompresorů. Jedním z komponent, kde je velmi žádoucí rozšiřovat obálku provozních parametrů, jsou právě hydrodynamická ložiska.



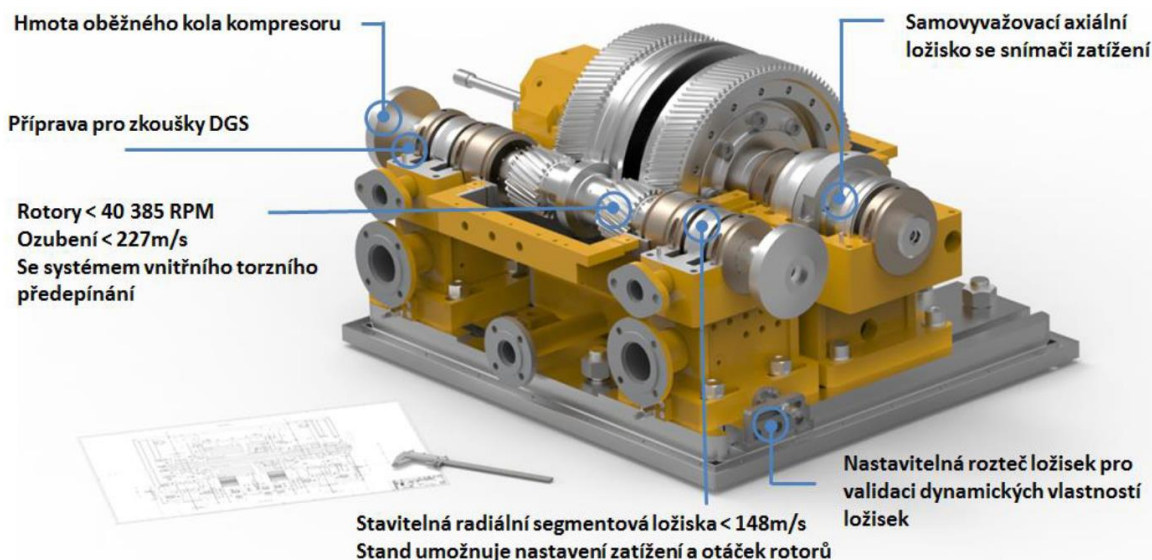
Obr. 157: Experimentální převodkový stand

Proto se společnosti GTW BEARINGS a Howden ČKD Compressors stali spoluřešiteli v projektu centra kompetence TAČR. Jedním z cílů projektu byl návrh a zprovoznění modulárního experimentálního standu pro validaci parametrů kluzných radiálních a axiálních ložisek v aplikaci turbokompresorů, a to včetně limitních provozních stavů.

Toto experimentálním zařízením podobné rychloběžné převodovce je schopné simulovat všechny druhy zatížení, které na ložisko během chodu kompresu působí. Toto zařízení je v současné době ve vlastnictví HOWDEN ČKD Compressors a GTW BEARINGS.

Pro ověření funkčnosti samo-vyrovnávacího mechanismu v ložisku je zde možnost sledování těchto parametrů:

- Teploty a ztrátový výkon ložisek.
- Naplávání rotoru v ložisku.
- Identifikace dynamických parametrů ložisek z hlediska rotorové dynamiky.
- Funkce měření síly působící na axiální ložisko.



Obr. 158: Experimentální převodkový stand

Samotný stand se skládá ze základové desky, 4 nezávislých ložiskových stojanů, rotorů uložených v hydrodynamických ložiscích a dalšího příslušenství.

Pomaloběžný rotor je uložen v kluzných radiálních ložiscích s pevným profilem. Pomaloběžný rotor je veden samo-vyrovnávacím axiálním kluzným ložiskem s naklápěcími segmenty. Toto ložisko je osazeno zdvojeným snímačem axiální síly. Tyto snímače jsou zde použity pro ověření funkce samotného ložiska a také se jedná o jakousi přípravu pro nasazení v ostrém provozu na zkušebním kompresoru Darina, kde bude toto ložisko sloužit k vyhodnocení axiálního tahu radiálních stupňů pro převodové kompresory.

Rychloběžný rotor je uložen v radiálních segmentových stavitelných ložiscích. Tato ložiska jsou pro potřeby projektu vybavena rozšířeným měřením teploty v segmentech. Sestava základové desky a ložiskových stojanů umožňuje změnu ložiskové vzdálenosti. Tato vlastnost je

přínosná z hlediska validace rotorové dynamiky. Z důvodu změny rozteče je stand osazen stavitelnými labyrintovými ucpávkami.

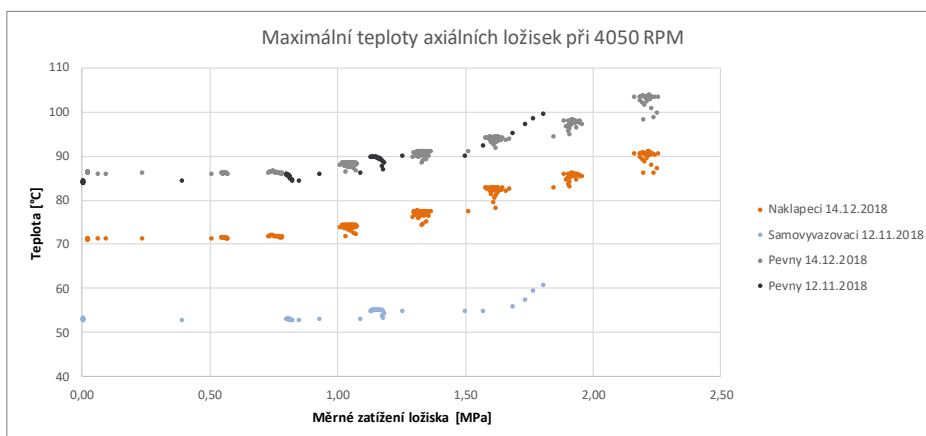
Systém rotorů je z důvodu zajištění mazání zubového záběru zajištěn děleným krytem zajišťujícím přívod a odpad oleje a zároveň osazení části snímačů.

Během projektu proběhly (mimo jiných zkoušek) i zkoušky axiálních ložisek. Byly porovnány 3 typy ložisek: s pevným profilem, s naklápěcími segmenty (8 axiálních segmentů) a konečně nově vyvinuté ložisko se samo-vyrovnávacím vahadlovým systémem (8 axiálních segmentů). Obě ložiska s naklápěcími segmenty měly shodně segmenty na roztečné kružnici 115 mm.

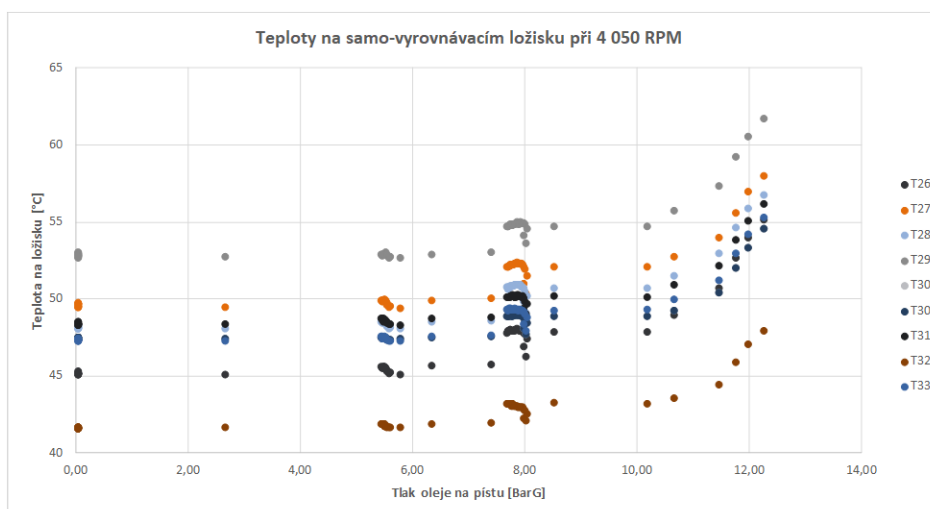
Více dat z měření je v příloze č. 22.

Teploty axiálních ložisek pod zatížením

Zkoušky axiálních ložisek zahrnovaly také zkoušení v zatíženém stavu. Zkoušené ložisko bylo zatěžováno s pomocí hydraulického pístu. Nicméně dosavadní měření prokázalo nevhodnou konstrukci zatěžování ax. ložiska. Vlivem tření v o-kroužkách docházelo při měření k významné hysterezi, která ovlivňovala přesnost měření.



Obr. 159: Maximální teploty na všech axiálních ložiscích v závislosti na měrném zatížení ložiska



Obr. 160: Teploty na samo-vyrovnávacím ložisku v závislosti na měrném zatížení ložiska

Během zkoušek axiálních ložisek na experimentálním standu bylo zjištěno několik konstrukčních aspektů, které je nutné na zařízení do budoucna vylepšit. Nicméně se podařilo poměrně dobře porovnat mezi sebou jednotlivé konstrukce ložisek z hlediska dosahovaných teplot pod proměnnými zatíženími a rychlostmi. Pokud uvažujeme jako etalon ložisko s pevným profilem, použitím konvenčního ložiska s naklápěcími segmenty je možné snížit maximální teplotu v ložisku o cca 15 °C. Použitím nového typu ložiska s vyrovnávacími elementy došlo dokonce ke snížení teploty až o 40 °C při srovnatelné rychlosti a zatížení. Funkce vahadlového systému se projevila také v rovnoměrnosti teplot po obvodu (po segmentech), kdy maximální rozdíl teplot dosahoval 15 °C. U pevného, resp. segmentového ložiska je to 43 resp. 33 °C.

V kombinaci s možností měření síly pod segmenty se proto nový typ ložiska se samo-vyrovnávacím mechanismem jeví jako mimořádně vhodný pro použití v odstředivých kompresorech.

7.5.3 Experimentální kompresorové zařízení Darina IV

Experimentálním zařízením Darina IV podobné radiálnímu odstředivému turbokompresoru je unikátní zařízení s pohonem o výkonu 1,2 MW umístěné v NTC při ZČU v Plzni. Toto turbodmychadlo slouží pro ověřování matematických modelů průtokových parametrů radiálních stupňů odstředivých kompresorů pomocí stlačování atmosférického vzduchu při otáčkách až 16 500 min⁻¹. Jde tedy zařízení schopné plnohodnotně simulovat reálné podmínky zatížení, které na ložisko během chodu působí. Z tohoto důvodu bylo toto zařízení vybráno pro komplexní ověření funkčnosti.

Zařízení je v současné době ve vlastnictví HOWDEN ČKD Compressors a je již rozmontované.



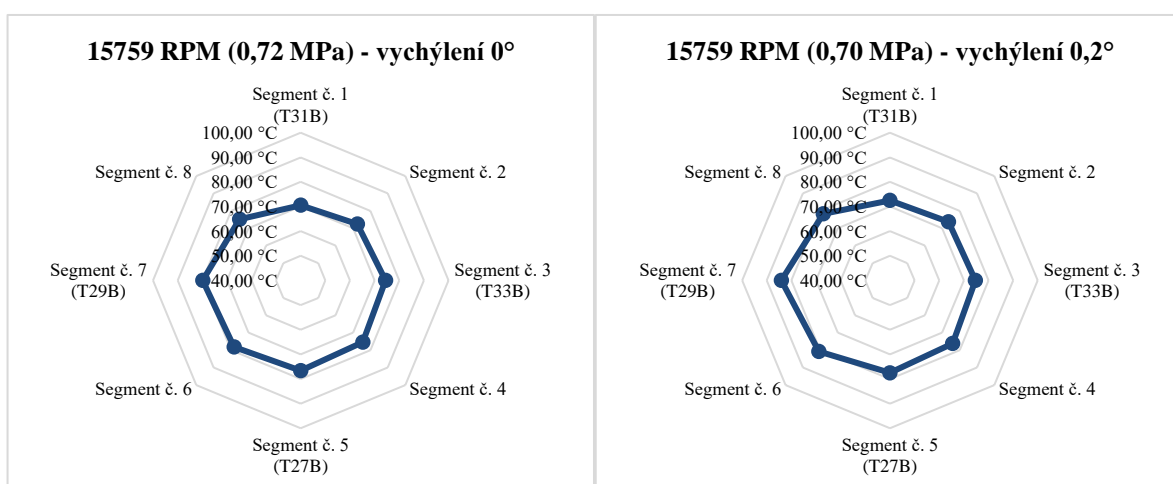
Obr. 161: Experimentální kompresorové zařízení Darina IV

Pro ověření funkčnosti samo-vyrovnávacího mechanismu v ložisku je zde možnost sledování těchto parametrů:

- Teploty ložisek.
- Ztrátový výkon ložisek (aktivní i pasivní strana dohromady – nepřesné).
- Naplávání rotoru v ložisku.
- Funkce měření síly působící na axiální ložisko.

Pro test v tomto zařízení byl použit prototyp ložiska s 8 segmenty na roztečné kružnici 115 mm.

Pro přesně definované vychýlení axiálního ložiska byly použity broušené podkladové plechy, které byly nabroušeny pod úhly 0° , $0,1^\circ$ a $0,2^\circ$.



Obr. 162: Teplotní pole ložiska při 0° vychýlení (vlevo) a při $0,2^\circ$ vychýlení (vpravo)

Z grafů zobrazující teplotu každého segmentu je patrné, že obrazec teplot u vychýlení pod 0° byl tvarově velice podobný s obrazcem teplot u vychýlení pod úhlem $0,2^\circ$.

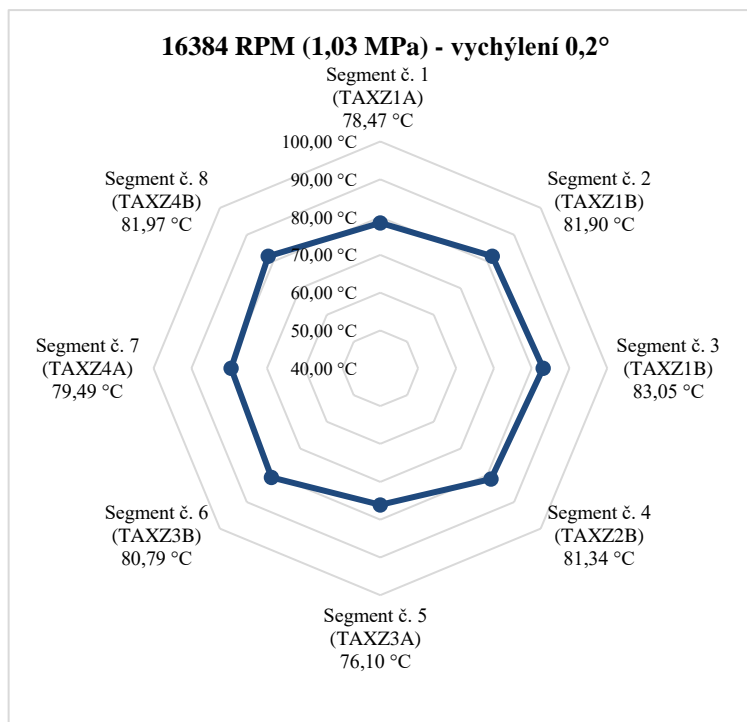
V absolutních hodnotách byl u vychýlení 0° rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší teplotou segmentu $9,3^\circ\text{C}$. U vychýlení $0,2^\circ$ byl rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší teplotou segmentu $11,6^\circ\text{C}$.

Experimentální zařízení Darina IV bylo následně upraveno tak, aby síla na axiální ložisko byla vyšší. Povedlo se docílit relativně solidního zatížení 1 MPa při rychlosti 16384 ot. /min, což už je reálné zatížení axiálních ložisek u radiálních odstředivých kompresorů. Axiální ložisko zůstalo neměnné.

Při tomto vyšší zatížení byl teplotní rozsah Δt dokonce menší než při nižším zatížení a to 7°C . Tento nižší rozsah teplot lze vysvětlit tak, že při vyšším zatížení byly překonány třecí odporu uvnitř ložiska a tím došlo k lepšímu efektu vyrovnání.

Navzdory tomu, že limit vychýlení pro ložisko byl konstrukčně stanoven na $0,1^\circ$, tak prototyp ložiska zvládl bez problémů i dvojnásobné vychýlení a vzhledem k tomu, že se teploty obou

segmentů pohybovaly silně pod možným maximem, které se nachází okolo 115 °C, tak lze říci, že prototyp ložiska by zvládl i vychýlení násobně větší než 0,2°.



Obr. 163: Teplotní pole ložiska při 0,2° vychýlení

7.5.4 Diskuze nad výsledky

Bylo vyrobeno několik prototypů, které byly postupně otestovány u dvou významných českých dodavatelů energetických zařízení: Doosan Škoda Power a Howden ČKD Compressors.

Prototypy ložisek byly otestovány v experimentální turbíně DOOSAN Škoda Power TG 10, v experimentálním převodovkovém standu a v experimentálním kompresorovém zařízení Darina IV Howden ČKD Compressors.

V experimentální turbíně DOOSAN Škoda Power TG 10 pracoval prototyp ložiska velice dobře i při plném zatížení => měřené teploty, stejně tak i axiální síly působící na spodní a horní segment v ložisku se téměř nelišily.

V experimentálním převodovkovém standu bylo během zkoušek axiálních ložisek zjištěno několik konstrukčních aspektů, které je nutné na zařízení do budoucna vylepšit. Nicméně se podařilo poměrně dobře porovnat mezi sebou jednotlivé konstrukce ložisek z hlediska dosažených teplot pod proměnnými zatíženími a rychlostmi. V porovnání s konvenčními typy ložisek došlo ke snížení teploty měřené v axiálních segmentech až o 40 °C při srovnatelné rychlosti a zatížení. Funkce vahadlového systému se projevila také v rovnoměrnosti teplot po obvodu (po segmentech), kdy maximální rozdíl teplot dosahoval 15 °C. U konvenčních typů ložisek byl rozdíl až 43 °C.

V experimentálním kompresorovém zařízení Darina IV zvládl prototyp ložiska u vychýlení i pod úhlem $0,2^\circ$, ačkoliv konstrukčně byl „stavěný“ pouze pro vychýlení pod úhlem $0,1^\circ$. Vzhledem k tomu, že se teploty obou segmentů pohybovaly silně pod možným maximem, které se nachází okolo 115°C , tak lze říci, že prototyp ložiska by zvládl i vychýlení násobně větší než $0,2^\circ$.

Všechny výše zmíněné experimenty byly krátkodobého charakteru, a proto nemělo smysl testovat při těchto experimentech životnost vahadel. Proto také nejsou v tomto hodnocení přiloženy žádné snímky opotřebení vahadel. Vahadla po těchto krátkodobých testech nevykazovala nejmenší známky opotřebení. Cíl těchto experimentů však nebylo ověřit trvanlivost vahadel, ale komplexně ověřit celkovou funkčnost nově vyvinutého typu ložiska.

To, jestli samo-vyrovnávací mechanismus je, či není funkční, bylo velice snadné určit. A to pomocí změřené teploty v jednotlivých kluzných segmentech, nebo dle velikosti reakční síly působící rovněž na axiální kluzné segmenty. V obou těchto případech platí, že pokud samo-vyrovnávací mechanismus funguje, hodnoty teplot nebo reakčních sil by měly být v každém segmentu téměř totožné (s odchylkou do 10 % maximálně 15 %).

Ve všech experimentálních zařízeních vykazovaly všechny prototypy ložisek velice dobré hodnoty a vlastnosti těchto prototypů, zcela naplnili očekávání, která byla na začátku vývoje stanovena. V kombinaci s možností měření síly pod segmenty se proto nový typ ložiska se samo-vyrovnávacím mechanismem jeví jako mimořádně vhodný pro použití jak v turbínách, tak i v kompresorech ale i jiných energetických zařízeních.

8 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo pomocí technologičnosti konstrukce vyvinout speciální samo-vyrovnávací axiální ložisko s naklápěcími segmenty s ohledem na optimální funkčnost ložiska a efektivitu výroby ložiska. Bylo proto potřeba se nejdříve zorientovat v problematice možností výroby axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy a vytvořit tak komplexní informační základnu v dané oblasti pro její následnou experimentální část.

První část práce byla zaměřena na rešerši současného stavu z hlediska technologičnosti konstrukce. Konstrukce axiálního ložiska se samo-vyrovnávacími elementy, kterou bychom mohli považovat za technologicky vhodnou, musí mimo základních požadavků na funkci splňovat i požadavky z hlediska výroby. Základním kritériem pro posuzování technologičnosti konstrukce při splnění všech funkčních požadavků jsou výrobní náklady. Pro účel analýzy technologičnosti konstrukce klíčových dílů ložiska byly vybrány tři tematické okruhy: *Tvar, Materiál a Technologie*. Díky tomuto rozdělení se dalo podívat na jednotlivé součásti z několika pohledů a pomocí vícekritériálních tabulek se tak lépe rozhodnout o dalším směru práce. Vše je pak zrcadleno v kapitole 6 (stanovení cílů disertační práce).

Experimentální část byla rozdělena na několik dílčích experimentů. Pokud bychom chtěli povrch vahadla otestovat na dlouhodobou trvanlivost a zatížit ho všemi složkami zatížení naráz, nezbylo by nám nic jiného než postavit jednoúčelové experimentální zařízení. V podstatě turbínu, či turbokompresor, nebo jiné zařízení schopné vyvinout všechny potřebné složky zatížení. Vzhledem k tomu, že bylo nutné nalézt optimální drsnost a povrchové zpevnění funkčních ploch vahadel, tak bylo potřeba otestovat několik desítek různých povrchů. To by znamenalo několik desítek dlouhodobých testů ve speciálním zařízení. Takovýto test by byl extrémně dlouhý a nákladný. Proto bylo přistoupeno k daleko racionálnější a ekonomičtější variantě, tj. ke kombinaci několika dílčích testů provedených na stávajících, ale i na nově postavených zařízeních, která byla zbudována právě pro účel vývoje tohoto typu ložiska v České republice. Po nalezení optimálního řešení vzešlého z těchto dílčích testů byly pomocí inženýrských přístupů ve výrobě a v technické přípravě výroby navrženy prototypy axiálního samo-vyrovnávacího ložiska. Následně byly provedeny série komplexních testů prototypů ložisek v několika experimentálních zařízeních schopných již simulovat reálný provoz. Ve všech experimentálních zařízeních vykazovaly všechny prototypy ložisek velice dobré hodnoty a vlastnosti těchto prototypů, zcela naplnili očekávání, která byla na začátku vývoje stanovena.

Zapojení významných partnerů v oblasti energetiky bylo v tomto projektu klíčové. Zákazníci byli svědci vývoje nového produktu od úplného počátku. Zpětná vazba byla velice prospěšná a měla na finální produkt výrazný vliv. Výsledné řešení samo-vyrovnávacího axiálního ložiska proto splňuje veškeré požadavky zákazníků vč. možnosti tzv. modulárního provedení (tzn. možnosti použití v kombinaci s radiálním ložiskem), nebo možnosti osazení měřícím zařízením na změření zatížení ložiska. Toto řešení je i od roku 2018 chráněno užitným vzorem číslo 31447, jehož původcem je autor této práce.

Soupis publikací autora

- (1) **Ing. Marek Urban**, prof. Ing. Katarína Monková, Ph.D. - Research of surface treatment effect on tribological properties of 34CrNiMo6 steel in the production of a newly designed self-equalizing thrust bearing, (Metals, 2019)
- (2) **Ing. Marek Urban** – *NESYMETRICKY ZATĚŽOVANÁ LOŽISKA V ENERGETICKÝCH ZARÍZENÍCH* (wWARD, ČVUT Praha 2019)
- (3) **Ing. Marek Urban**, prof. Ing. Katarína Monková, Ph.D., doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D. – *Nesymetricky zatěžovaná ložiska v energetice* (Strojírenská technologie Plzeň 2019)
- (4) Katarína Monkova; Peter Pavol Monka; Adriana Sekerakova; Lumír Hruzík; Adam Burecek; **Marek Urban** – *Comparative Study of Chip Formation in Orthogonal and Oblique Slow-Rate Machining of EN 16MnCr5 Steel* (Metals 2019, Volume 9, Issue 6, 698)
- (5) Katarína MONKOVA, Peter MONKA, Dražan KOZAK, Miroslav HOLEČEK, **Marek URBAN** – *Investigation of Toothed Shaft from the View of Modal Parameters* (TEHNIČKI VJESNIK – TECHNICAL GAZETTE Vol. 26 No. 1, 2019)
- (6) **Ing. Marek Urban**, doc. Ing. Katarína Monková, Ph.D., doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D. - *Problematika zefektivnění výroby, měření a funkčnosti nesymetricky zatěžovaného ložiska v energetice* (Strojírenská technologie Plzeň 2017)
- (7) MONKOVA Katarína, MONKA Peter, HRIC Slavomir, **URBAN Marek** – *Comparison of Natural Frequencies Evaluated Experimentally and Numerically* (12th INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE, Nyíregyháza, HUNGARY 2017)
- (8) Peter Monka, Katarína Monkova, David Kološ, **Marek Urban** – *QUALITY AND PRODUCTIVITY ENHANCEMENT AT THE MACHINING OF WEAR RESISTANT HARD COATS* (The 9th International Working Conference – Total Quality Management, Advanced and Intelligent Approaches, Belgrade, Serbia 2017)
- (9) Katarína Monkova, Peter Monka, Slavomir Hric, Vladimír Ondek, **Marek Urban** - *Investigation of Chip Dimensional Characteristics Created by the Specific Cutting Tool at the Machining of 12 050 Steel* (Key Engineering Materials (Volume 730) (2017)
- (10) SLAVOMIR HRIC, DOMINIKA LEHOČKA, VLADIMIR ONDEK, **MAREK URBAN** – *Application of Theory Related to Kinematic Analysis of Mechanism into Educational Process* (2nd International Conference on Education, Management and Systems Engineering, Beijing, China 2017)
- (11) ANDREA CIZIKOVA, KATARINA MONKOVA, PETER MONKA, **MAREK URBAN** – *ANALYSIS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS AT SPINDLE OF CNC MACHINING CENTRE* (MM SCIENCE JOURNAL, December 2016)
- (12) Katarína MONKOVA, Peter MONKA, Maria KACALOVA, **Marek URBAN** – *Static Analysis of Gantry Crane — Preliminary Study* (INTERNATIONAL CONFERENCE on ADVANCED MANUFACTURE TECHNOLOGY and INDUSTRIAL APPLICATION, Shanghai, China 2016)
- (13) KATARINA MONKOVA, PETER MONKA, SERGEJ HLOCH, MILAN BALARA, **MAREK URBAN** – *Robot Actuators Definition — Preliminary Study* (INTERNATIONAL CONFERENCE on INFORMATICS, MANAGEMENT ENGINEERING and INDUSTRIAL APPLICATION, Phuket, Thailand 2016)

- (14) **Marek Urban** – *Měření axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy a konstrukce přípravku pro měření jejich maximálního vychýlení* (Strojírenská technologie Plzeň 2015)
- (15) **Marek Urban** – *Construction of a special milling tool for cutting of difficult-to-machine materials* (Vrstvy a povlaky 2011)
- (16) **Marek Urban** – *DESIGN OF A SPECIAL MILLING TOOL FOR EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF TEMPERATURE* (Povrchové inženýrstvo 2011)
- (17) **Marek Urban** – *Konstrukce speciální frézy pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů* (Strojírenská technologie Plzeň 2011)
- (18) **Marek Urban** – *DESIGN OF A SPECIAL MILLING TOOL FOR EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF CUTTING FORCES DURING CUTTING MATERIALS WITH DIFFICULT MACHINABILITY* (ERIN 2011)
- (19) **Marek Urban** – *Konstrukce speciálního frézovacího nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů*, Diplomová práce, (Plzeň 2011)
- (20) **Marek Urban** – *Konstrukce speciální frézy pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů* (SVOČ – FST 2011) – celkové 1. místo v magisterské sekci SVOČ FST
- (21) **Marek Urban** – *Konstrukce soustružnického nože s VBD pomocí SW Catia V5*, Bakalářská práce, (Plzeň 2009)
- (22) **Marek Urban** – *Konstrukce soustružnického nože s VBD pomocí SW Catia V5* (SVOČ – FST 2009) – celkové 3. místo v bakalářské sekci SVOČ FST

LITERATURA

- [1] Ministerstvo průmyslu a obchodu, *Státní energetická koncepce*, MPO, 2016.
- [2] DOOSAN, „Power Plants Retrofits & Upgrades,“ [Online]. Available: <http://www.doosan.com/en/business-area/energy/power-plants-retrofits-and-upgrades.do>. [Přístup získán 2016].
- [3] P. Corporation, „Coal power plant upgrades and retrofits,“ [Online]. Available: <http://www.powerengineeringint.com/coal-fired/coal-upgrades.html>.
- [4] MPO - Ministerstvo průmyslu a obchodu, „Priority Ministerstva průmyslu a obchodu na rok 2015,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.mpo.cz/dokument155326.html>.
- [5] MPO - Ministerstvo průmyslu a obchodu, „PANORAMA ZPRACOVATELSKÉHO PRŮMYSLU ČR,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.mpo.cz/dokument162071.html>.
- [6] DOOSAN Škoda Power, *Katalog - Retrofit Projects*, Plzeň.
- [7] DOOSAN Škoda Power, „Katalog Parní turbíny a generator,“ [Online]. Available: http://www.doosanskodapower.com/attach_files/rochures/steam/SteamTurbineGenerators.pdf.
- [8] Urban, *Interní dokument: Theory of plain bearings and their specifications*, Plzeň: GTW, 2014.
- [9] Urban, Dolejš, Plasová, Kropíková a Šujanec, *Interní dokument GTW: Technická zpráva 1111 2014-1 WP2*, Plzeň: GTW, 2014.
- [10] M. Urban, T. Skopeček a J. Dolejš, „Měření axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy a konstrukce přípravku pro měření jejich maximálního vychýlení,“ v *Strojírenská technologie 2015 - SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ*, Plzeň, 2015.
- [11] Jiří Šimek, „Kluzná ložiska a uložení rotorů,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.techlab.cz/>. [Přístup získán 2016].
- [12] Gleitlagertechnik Weißbacher GmbH, *Handbuch für den Einsatz von GTW-Gleitlagern*, 2005.
- [13] Kingsbury, *GENERAL GUIDE TO THE PRINCIPLES OPERATION AND TROUBLESHOOTING OF HYDRODYNAMIC BEARINGS*, Philadelphia, USA, 2010.
- [14] Kingsbury, *Katalog - Thrust and Journal Bearings*, Philadelphia, USA, 2009.
- [15] Waukesha, *Katalog - Modular Tilting Pad Thrust Bearings - Compact Equalized - CQ Brochure*, 2009.
- [16] Waukesha, *Katalog - Modular Tilting Pad Thrust Bearings - DH B 5A – MS range*, 2011.
- [17] SubsTech, „www.substech.com,“ 2015. [Online]. Available: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=lubrication_regimes. [Přístup získán 2014].

- [18] S. JAROSLAV, „Kluzné poddajné axiální segmentové ložisko“. Československá socialistická republika Patent 249400, 15 01 1988.
- [19] Kingsbury, „Dealing With Misalignment Issues On Non-Equalizing Thrust Bearings,“ [Online]. Available: <http://www.kingsbury.com/bearing-misalignment-issues.shtml>.
- [20] GTW, *Interní dokumenty GTW*, 2016.
- [21] Pioneer motor bearing, *Bearing damage - Flip Chart*, 2007.
- [22] Kingsbury, Katalog - Low profile equalizing LEG bearings, 2016.
- [23] John Crane, Katalog: TILTING PAD THRUST BEARINGS, 2015.
- [24] Kingsbury, „Equalize Your Additional Misalignment,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.kingsbury.com/pin-type-leveling-plates.shtml>.
- [25] Martsinkovsky, Yurko, Tarelnik a Filonenko, „Designing Thrust Sliding Bearings of High Bearing Capacity,“ v *XIIIth International Scientific and Engineering Conference "HERVICON-2011"*, Sumy, Ukrajina, 2011.
- [26] John Crane, „Katalog: Hydrodynamic Bearings (Multilobe, Tilting Pad and Combined Bearings),“ 2008. [Online].
- [27] M. Urban, *Měření axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy*, 2014.
- [28] Kingsbury, *Katalog: Equalizing Thrust Bearings (COMPREHENSIVE DESIGN GUIDE)*, 2011.
- [29] Kingsbury. [Online]. Available: <http://www.kingsbury.com/>.
- [30] Active Load, „<http://www.activeload.co.uk>,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.activeload.co.uk/articles/pillar-load-cells-134/>.
- [31] Kingsbury, „Kingsbury 5J Rocker,“ [Online]. Available: <http://www.3dcontentcentral.com/download-model.aspx?catalogid=171&id=181324>. [Přístup získán 2016].
- [32] kolektiv autorů, „Tribologie,“ TU v Liberci, Katedra strojírenské technologie, [Online]. Available: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf. [Přístup získán 2016].
- [33] M. Urban, „Měření axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy a konstrukce přípravku pro měření jejich maximálního vychýlení Rešerše pro předmět DSME,“ 2014.
- [34] Kingsbury, „Equalizing Thrust Bearing Misalignment,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.kingsbury.com/etb-misalignment.shtml>.
- [35] F. Straka, *Static Analysis of Self-equalizing System in Tilting Pad Thrust Bearing*, Plzeň: Doosan Skoda Power, 2013.

- [36] J. Vimmr, *Podklady k 1. cvičení z předmětu KME / MECH2*, ZČU v Plzni.
- [37] L. A. Branagan, „Survey of Damage Investigation of Babbitted Industrial Bearings,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/2075-4442/3/2/91/htm>.
- [38] P. Hofman, *Přednášky z předmětu Technologie montáže*, Plzeň: Katedra technologie obrábění, 2010.
- [39] Z. V. Mádl, *TECHNOLOGIČNOST KONSTRUKCE*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005.
- [40] Z. Příkryl, *Technologičnost konstrukce*, Praha: ČVUT, 1971.
- [41] A. Polášek, *Diplomová práce: Návrh a ověření technologie obrábění klíčových komponentů samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska*, Katedra Technologie Obrábění FST na ZČU v Plzni, 2016.
- [42] Mitsubishi Heavy Industry(Compressor Corporation), *Replacement of thrust bearing with improved type*, CT-S-023, 2012.
- [43] S. NODA, S. ZENITANI, Y. YAMADA a T. SASAKI, „Improved Technologies of Steam Turbine for Long Term Continuous Operation,“ *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd - Technical Review Vol. 41 No. 3*, 2004.
- [44] J. Zidar, „ANTI-FRETTING LAYER“. USA Patent US 2013/0051715 A1, 2013.
- [45] Waukesha, „Bearing Damage: Fretting,“ [Online]. Available: <http://www.waukbearing.com/en/technical-resources/bearing-damage-index/bearing-damage:-fretting/>. [Přístup získán 2016].
- [46] Advanced Mechanical Engineering Solutions, „HERTZIAN CONTACT STRESS,“ [Online]. Available: <http://www.amesweb.info/HertzianContact/HertzianContact.aspx>.
- [47] R. Budynas a K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design - Hertz Contact Stresses 10th edition*, McGraw-Hill, 2014.
- [48] Morávka, Študent a Adlerová, *ANALÝZA SAMOVYVAŽOVACÍHO SYSTÉMU*, Plzeň: NTC při ZČU, 2019.
- [49] Belajev, *Pružnost a pevnost I.*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [50] GOMBÁR, *Plánovanie experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu technologických procesov*, Prešov: Podklady k přednáškám, 2017.
- [51] TOŠENOVSKÝ, *Plánování experimentů*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [52] MICHÁLEK, *Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE) - Učební texty k semináři.*, Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií, 2010.

- [53] BÍCOVÁ, *Příspěvek k hodnocení ukazatelů výrobního procesu*, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, 2016.
- [54] KOŽÍŠEK a STIEBEROVÁ, *Statistika v příkladech*, Praha: Verlag Dashöfer, 2011.
- [55] MILDE, „Analýza rozptylu (Analysis of Variance - ANOVA),“ 2017. [Online].
- [56] Michálek a Král, „STATISTICKÉ ŘÍZENÍ PROCESŮ SE SW PODPOROU,“ 2019. [Online].
- [57] GIBILISCO, *Statistika bez předchozích znalostí*, Brno: Computer Press, a.s. ISBN 978-80-251-2465-9, 2009.
- [58] F. S. J. Křenek, „Porovnání samovyrovnávacích mechanismů GTW,“ Doosan Škoda Power, 2017.
- [59] JENOPIK, „Drsnost povrchu dle DIN EN ISO,“ [Online]. Available: <https://www.hommel-ematic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>.
- [60] O. Zítko, *NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO STANDU PRO OVĚŘENÍ PARAMETRŮ KLUZNÝCH LOŽISEK*, Praha: Howden ČKD Compressors, 2016.
- [61] O. Zítko, *OPTIMALIZACE A DATABÁZE HYDRODYNAMICKÝCH KLUZNÝCH LOŽISEK*, Praha: Howden ČKD Compressors, 2018.
- [62] O. BAŠEK, „Mobilní zařízení pro povrchové kalení,“ 2010.
- [63] K. DAŘOUREK, „Povrchové kalení,“ 2007.
- [64] K. DAŘOUREK, „Vybrané technologie povrchových úprav,“ 2006.
- [65] K. RÁDL, „Chemicko-tepelné zpracování tenkých vrstev,“ 2015.
- [66] A. H. V. HOLEMÁŘ, *Iontová nitridace v praxi*, Praha: SNTL, 1989.
- [67] V. T. J. K. J. HRUBÝ, *Povrchové technologie*, Brno: Vojenská akademie, 1995.
- [68] D. M. Bayes, *The Physical Properties of Electroless Nickel Coatings*, Cincinnati : Proceedings EN 95 Conference, November 1995.
- [69] I. V. V. Ing. Petr Goliáš, *Bezproude niklování*.
- [70] D. VIČAR, „Moderní dokončovací metody obrábění a jejich využití,“ 2011.
- [71] Vajskebr a Špeta, *Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním*, SNTL, 1984.
- [72] BEZROUKOVÁ, *Bakalářská práce: TECHNOLOGIE VÁLEČKOVÁNÍ VE STROJÍRENSTVÍ*, Brno: VUT, 2009.
- [73] O. HRONEK, *Zvyšování kvality povrchu proudem abraziva*, Západočeská univerzita v Plzni, 2015.

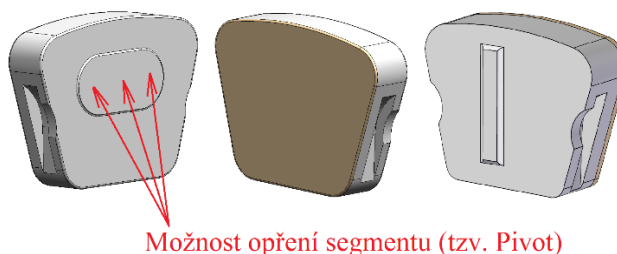
- [74] O. HRONEK, *Vliv kvality povrchu nástroje na trvanlivost*, Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [75] „DISKOVÁ odstředivá zařízení,“ [Online]. Available: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/diskova-odstrediva-zarizeni/>. [Přístup získán 2018].
- [76] „VLEČNÁ OMÍLACÍ ZAŘÍZENÍ,“ [Online]. Available: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/vlecna-omilaci-zarizeni/>. [Přístup získán 2018].
- [77] „Žlabové vibrátory,“ [Online]. Available: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/zlabove-vibratory/>. [Přístup získán 2018].
- [78] „PROUDOVÉ OMÍLACÍ ZAŘÍZENÍ,“ [Online]. Available: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/proudove-omilaci-zarizeni/>. [Přístup získán 2018].
- [79] „Chemický urychlené omílání,“ [Online]. Available: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32010/chemicky-urychlene-omilani.html>. [Přístup získán 2018].
- [80] „Technologie ISF®: Velmi jemné povrchy,“ [Online]. Available: <https://cz.rosler.com/cz-cs/technologie-opracovani/isfr/>. [Přístup získán 2018].
- [81] L. FIEDLER, „Vliv parametrů laserového navařování na korozní vlastnosti návaru,“ 2014.
- [82] RTI při ZČU, „Tisková zpráva: "VÝZKUMNÉ CENTRUM RTI POŘÍDILO VYBAVENÍ PRO ROZVOJ TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ",“ 2016. [Online].
- [83] Jan Liška, *Diplomová práce: Obrábění laserových návarů při rychlých opravách forem*, KTO, ZČU v Plzni, 2012.
- [84] P. Marchevka, *Diplomová práce: Aplikace technologie laserového přetavení HVOF stříkaných povlaků ke zvýšení kvality povlaků na bázi Co*, KMM, ZČU v Plzni, 2014.
- [85] Houdková, Enžl a Bláhová, „Žárové nástřiky,“ 2013. [Online].
- [86] Peter Monka, *Prezentace dílčího projektu A8, Rozvoj Regionálního technologického institutu - RoRT - Výzkum obrobiteľnosti vysoce namáhaných funkčních ploch žárových nástřiků a laserových návarů pro budoucí aplikace ve výrobě nástrojů a komponent*, RTI, ZČU, 2016.
- [87] „Ekonomická fakulta JČU,“ [Online]. Available: Dostupné z: <http://www2.ef.jcu.cz/~jfrieb/tspp/data/teorie/Vicekritko.pdf>. [Přístup získán 5 květen 2016].
- [88] HENDL, *Přehled statistických metod: Analýza a metaanalýza dat*, Praha: Portál: ISBN 978-80-262-0981-2, 2015.
- [89] „PERFECT RESULTS With the right process media,“ [Online]. Available: <https://www.otec.de/en/products/media/>. [Přístup získán 2018].

Příloha 1: Diskuze o technologičnosti konstrukce ostatních dílů ložiska

1. Technologičnost konstrukce axiálního segmentu

Axiální segment je jednou z klíčových částí na ložisku a na celkovou kvalitu výroby je kladen nejvyšší možný důraz. Vzhledem k tomu, že GTW BEARINGS ročně vyrobí stovky sad axiálních segmentů, je zde jasný směr, a to v dědičnosti konstrukce.

Jediná změna, která je v současnosti možná, je tvar tzv. pívotu. V případě použití tlakového distribučního dílce totiž lze unifikovat varianty axiálního segmentu pro všechny směry otáčení hřídele (viz obr. P-1).



Obr. P- 1: Rozdíly v úpravě zadní části segmentu – vlevo pro samo-vyrovňovací provedení, vpravo standardní provedení [autor]

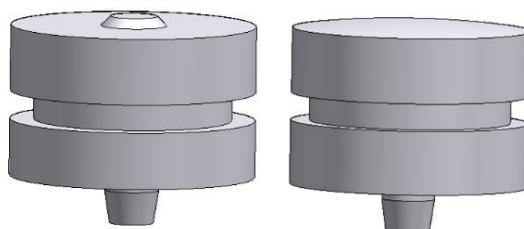
2. Technologičnost konstrukce tlakového distribučního dílce

Vzhledem k faktu, že uchycení axiálních segmentů musí být pomocí trysek (kap. 3.2), je nutné použít tlakový distribuční dílec.

Z hlediska technologičnosti konstrukce vahadel jako dílu, který je relativně hodně namáhán na tlak a je zároveň součástí rozměrového řetězce, je potřeba podtrhnout dvě důležitá klíčová slova – *přesnost (tvarová)* a *odolnost vůči otláčení*. V následujících odstavcích je proto v tlakový distribuční dílec rozebírán zejména z pohledu *tvaru*, použitého *materiálu* a možné *technologie výroby*.

2.1. Tvar (Geometrie)

Tvar tohoto dílu je poměrně jednoduchý. Součást je plně rotační. Na tomto dílci jsou dvě funkční plochy. Jedna plocha je v kontaktu s axiálním segmentem a tvoří tzv. pívit (kyvný bod segmentu). Tento pívit může být buď kulového tvaru, nebo jako ploška o malém průměru (viz obr. P-2). Druhá plocha je v kontaktu s vahadlem. Obě tyto plochy jsou namáhané na tlak a tolerance vzdálenosti mezi nimi musí být v řádu tisícín mm. Tato výška se získá broušením a následovným frézováním frézou s cermetovými destičkami ve speciálním přípravku.



Obr. P- 2: Tlakový distribuční dílec – rozdíly ploch, které se stýkají s axiálním segmentem – vlevo ploška o malém průměru, vpravo plocha kulového tvaru [autor]

Požadavky technologičnosti konstrukce z hlediska volby tvaru:

- Tvary ploch musí odpovídat, pokud možno, možnostem stávajícího výrobního zařízení.
- Tvar ploch musí změřitelný.

Tvar tlakového distribučního dílce je dále ovlivněn možnostmi výroby tenzometrický snímače. Tvary obou těchto dílů by měli být totožné a 100 % zaměnitelné.

Vzhledem k tomu, že kulová plocha je pro naklápění axiálních segmentů vhodnější a že jak společnost GTW, tak dodavatel tenzometrických snímačů vlastní technologie výroby přesné kulové plochy byl, pro první návrh zvolen tento kulový tvar.

2.2. Materiál

V úvodní rešerši bylo zjištěno, že pro výrobu tlakového distribučního dílce se používá tvrdá zušlechťená chrom-molybdenová ocel o vysoké pevnosti a tvrdosti, aby nedošlo při vzájemném kontaktu s vahadly (popř. axiálními segmenty) k opotřeby.

V rámci technologičnosti konstrukce jsou zde nejdůležitější hlediska technologie a mechaniky (znalosti mechanického namáhání).

Požadavky technologičnosti konstrukce tlakového distribučního dílce z hlediska volby materiálu jsou obdobné jako u vahadla (kapitola 3.3.2 a její podkapitoly).

2.3. Technologie

Technologie výroby navazuje na předchozí dvě kapitoly. V této kapitole je ve zkratce popsána problematika výroby tlakového distribučního dílce od technické přípravy výroby až po finální montáž včetně měření.

Požadavky technologičnosti konstrukce tlakového distribučního dílce z hlediska volby technologie výroby jsou obdobné jako u vahadla (kapitola 3.3.3).

Vlastní výroba je vhodná (produktivní) především pro CNC soustruh a dále pro horizontální frézovací centrum. Vzhledem k použití těžkoobrobitelných materiálu je zde potenciál v optimalizaci procesu obrábění (nástroje, řezné podmínky – HSC/HPC, v_c , f_z , a_p , a_e , způsob upnutí, strategie obrábění...).

Jak již bylo naznačeno v kapitole 3.2, sestavy tlakových distribučních dílců tvoří uzavřený řetězec, který je nejhodnější řešit metodou absolutní (úplné) vyměnitelnosti. Nejdůležitější rozměr je pak tedy výška samotného dílce, popřípadě celková výška sestavy, která se musí pohybovat v toleranci tisícín mm. Tato výška se získá broušením a následovným frézováním frézou s cermetovými destičkami ve speciálním přípravku.

Po dokončení výroby je potřeba také změřit finální výšku. Měření by mělo být jednoduché a rychlé.

3. Technologičnost konstrukce ostatních dílců axiálního ložiska (těleso, tryska)

Těleso samo-vyrovnávacího axiálního ložiska se téměř neliší od konvenčního tělesa ložiska s axiálními naklápěcími segmenty a vzhledem k tomu, že se v GTW BEARINGS ročně vyrobí stovky kusů těles pro axiální segmenty, je zde opět jasný směr v dědičnosti konstrukce. Vzhledem k zjištění, že výroba těles pro axiální ložiska je v GTW BEARINGS na velice dobré úrovni, není zde potřeba v první fázi vývoje nic měnit.

Stejně je to v případě technologičnosti konstrukce trysky. Tryska u samo-vyrovnávacího axiálního ložiska je shodná s tryskou u konvenčního ložiska s axiálními naklápěcími segmenty a vzhledem k zjištění, že výroba trysek pro axiální ložiska je v GTW BEARINGS na velice dobré úrovni, není zde potřeba v první fázi vývoje nic měnit.

Příloha 2: Technologie povrchových úprav a zpevnění

1 Povrchové kalení a cementace

Zdroje: [62] [63]

Tato metoda vyžaduje rychlý ohřev povrchu součásti a následné ochlazení, aby bylo docíleno zpevnění pouze v požadované povrchové vrstvě. S vysokou rychlostí ohřevu roste rychlost nukleace zárodků austenitu a díky tomu vzniká jemnější zrno výsledné martenzitické struktury. Dosahuje se tedy vyšší tvrdosti martenzitu v povrchové vrstvě než při objemovém kalení. Protože martenzitická struktura má větší objem než ferit, je v povrchové vrstvě příznivé tlakové napětí, které pozitivně ovlivňuje únavovou pevnost.

K povrchovému kalení se používají nejčastěji podeutektoidní uhlíkové oceli nebo nízkolegované s obsahem uhlíku 0,35 - 0,7 % hmotnosti. S konvenčním povrchovým kalením je úzce spojená cementace povrchu součástí z nízkouhlíkových ocelí (do obsahu uhlíku 0,35 % hmotnosti). Cementací se obohacuje pouze povrchová vrstva uhlíkem, který je nezbytný k vytvoření tvrdé martenzitické struktury.

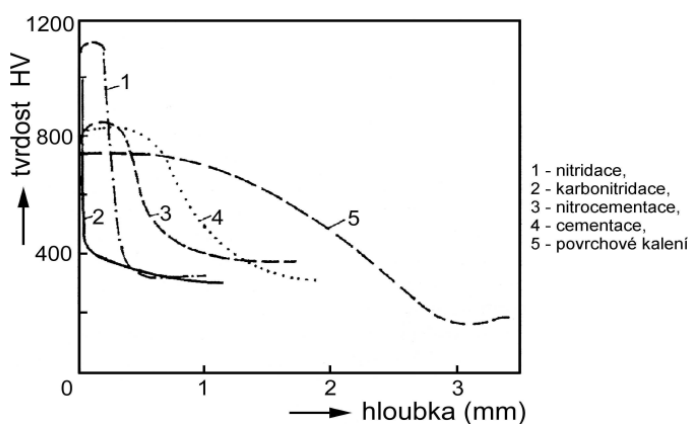
Další z mnoha možností, jak povrchově zakalit součást, je i laserové kalení. Laserové povrchové kalení umožňuje kromě běžně kalitelných ocelí zakalit i oceli s nízkým obsahem uhlíku (0,2 % hmotnosti). Laserové záření umožňuje dodat povrchu velmi rychle velké množství tepelné energie a díky tomu vzniká minimálně teplotně ovlivněné pásmo. Laserové zařízení se s výhodou umísťuje na průmyslové roboty pro snadné zaměření kaleného místa součásti. Roboti umožňují sériové nasazení této technologie. Mezi výhody patří: kvalita a rychlost provedení, minimální deformace součásti, nízké teplotní ovlivnění okolního materiálu, nevznikají povrchové trhliny, kalení přesně do požadovaného místa na součásti.

2 Nitridace

Zdroje: [64] [65] [66] [67]

Nitridace je druh chemicko-tepelného zpracování kovů, při kterém obohacujeme povrch kovu dusíkem ve formě atomů nebo iontů. Dalším zpracováním se vytváří velmi pevné nitridy v povrchové vrstvě. Nitridovat lze prakticky všechny druhy ocelí, případně litiny. Nitridace probíhá při nižších teplotách než cementace. Nitridová vrstva nelze dále zakalit ani popustit. Běžně lze nitridované součásti použít při teplotách 550 °C v některých případech až 600 °C. Lze je tedy používat bez nebezpečí popuštění, které hrozí při cementaci.

Nitridace je výhodná pro aplikace, kde je požadována vysoká tvrdost, otěruvzdornost a odolnost proti zadírání. Nejčastěji se používá při povrchových úpravách ozubených kol, klikových hřídelí, vačkových hřídelí, zdvihátek ventilů, dílů ventilů, protlačovacích trnů, razicích nástrojů, kovacíh zápustek, průtlačnic pro zpracování výrobků z Al, vstřikovačů a nástrojů pro lisování plastů. Nevýhodou nitridace oproti cementaci je zpravidla menší tloušťka vrstvy. Vzhledem k tomu se nitridace nehodí k zachycování velkých tlaků, pokud je materiál relativně měkký, jelikož by se vrstva mohla probořit.



Obr. P- 3: Srovnání tloušťky a hloubky obvyklých povrchových úprav [66]

Při nitridaci nedochází ke změně mřížky, tj nedochází ke změnám ferit (perlit) – austenit a opět nazpět. Při chladnutí nedochází k deformaci mřížky z titulu zpětné konverze A-F, tedy dilatace jsou minimální, pouze je nutno počítat s jistým nárůstem podpovrchových vrstev z důvodu difúze N. Po procesu jsou na povrchu převážně tlaková zbytková pnutí.

Při nitridaci lze rozeznat 3 oblasti:

- Sloučeninová vrstva nitridů železa (obecně ϵ -epsilon typ, ale také γ -gama fáze), popřípadě nitridů jiných/dalších legujících prvků (pokud jsou), která se v ČR vžila i pod názvem "bílá vrstva". Tato vrstva je na povrchu porézní a křehká.
- Difuzní vrstva, která na sloučeninovou vrstvu navazuje. Zde je přítomen N, který difunduje převážně do intersticiálních poloh v mřížce.
- Základní materiál, který nebyl nitridací ovlivněn.

Parametry nitridace lze řídit pomocí provozních parametrů:

- teplota v peci,
- čas,
- rychlost proudění plynu,
- aktivita prostředí,
- údržba provozního zařízení.

Bez udržování těchto požadavků nelze dosáhnout přijatelnou opakovatelnost výroby.

Další veličiny, které je nutno kontrolovat:

- plocha, která má být nitridována,
- odchod plynů z komory (zejména poloha),
- kontrola přehřevu nitridovaných součástí,
- kvalita očištění povrchu součástí,
- dodržování stálé metalurgické kvality oceli.

Tloušťka sloučeninové a difúzní vrstvy závisí jak na použitém základním materiálu, tak na dílčích parametrech technologie. Nicméně se řádově pohybuje v rozmezí 0–30 μm u sloučeninové vrstvy a několik desetin milimetru u difúzní vrstvy.

Nitridovat lze teoreticky všechny druhy ocelí. Zpravidla se však výběr omezuje na následující typy:

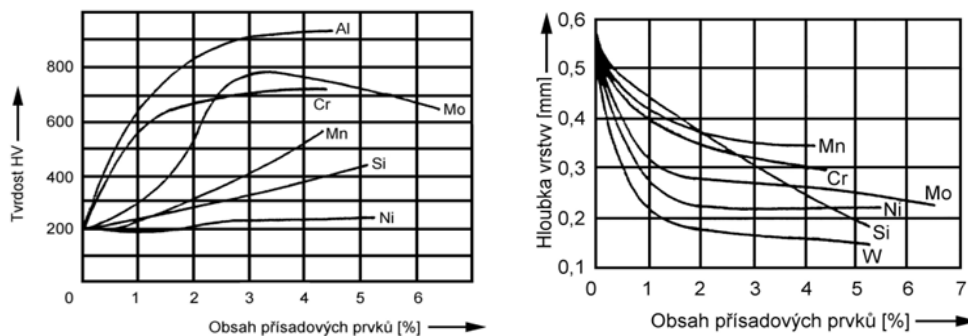
Tab. P- 1 Seznam ocelí nejčastěji používaných pro nitridaci [66]

materiál	druhy
oceli nelegované a nízkolegované	E295, C45, C60 37MnSi5 20Mn5, 40MnV7
oceli legované	34CrAl6, 41CrAlMo7, 31CrMoV9, 21CrMoV5-7, 37Cr4, 16MoCr5, 42CrMo4, 51CrV4, 15NiCr13, 34CrNiMo6
oceli nástrojové	HS6-5-2, 50CrMoV13- 15, K37CoMoV5-1, X40CrMoV5-1, X160CrMoV12-1, X190CrMo12

Nízkouhlíkové oceli umožní získat silnější vrstvu nitridů, ale jsou často relativně křehké a mají velmi malou kohezní integritu. Oceli s vyšším obsahem C díky přítomnosti většího množství Fe₃C kladou odpor difúzi N do materiálu. Nitridace těchto ocelí je časově náročnější.

Ke zvýšení tvrdosti vrstev výrazně přispívá přítomnost dalších prvků, které tvoří ještě tvrdší a odolnější nitridy. N se ochotněji slučuje zejména s prvky, ke kterým má vysokou afinitu. Z běžně vyskytujících se v ocelích se jedná zejména o Al. Obsah Al by měl být do 1%, Al působí nepříznivě na křehkost vrstvy. Jeho zvýšení nad tuto hranici nemá již na tvrdost povrchu výrazný vliv. Další prvky, které vytvářejí tvrdé nitridy, jsou Cr; Mo; Ti. Obsah Mo dokáže do určité míry kompenzovat negativní vliv Al na houževnatost oceli.

Ni není nitridotvorný prvek. Bylo zjištěno, že jeho přítomnost ve větších množstvích rychlost nitridace tlumí. Při legování Ni se zvyšuje pevnost, ale klesá rázová houževnatost. To je zřejmě zapříčiněno vznikem intermetalické fáze Ni-Al, která způsobuje vytvrzování matrice. Ostatní legury, jako Mn mají na nitridaci zanedbatelný vliv. Je nutno počítat, že část prvků s vysokou afinitou k C (Cr, Mo) bude využito při tvorbě karbidů a nezúčastní se nitridačního procesu. [66]



Obr. P- 4: Vliv obsahu prvků na tvrdost nitridované vrstvy (vlevo); Vliv obsahu leg. prvků na tloušťku nitridované vrstvy [67]

Na proces nitridace má velmi nepříznivý vliv oduhlíčení povrchu. Toto má za následek nedostatečnou adhezi k základnímu materiálu. Pokud je známo, že se zde tyto místa nachází je vhodné je třískově odstranit ještě před zahájení procesu.

Nitridace probíhá v různých prostředích. Ve zpracování nástrojů se s výhodou používá nitridace v solných lázních. Obvyklá je nitridace v plynu, plazmová, nebo iontová nitridace.

Tab. P- 2: Vhodná fázová struktura pro definované typy namáhání [66]

Rozhodující charakter namáhání	Obsah legovacích prvků v oceli	Fázové složení bílé vrstvy			Difúzní vrstva
		γ'	ϵ	$\gamma'+\epsilon$	
Otěrem	Nízký	+	++	Vícefázová vrstva není vůbec vhodná	-
	Střední	++	+		-
	Vysoký	-	-		++
Únavou	Nízký	+	++		-
	Střední	+	+		++
	Vysoký	-	-		++
Korozi	Nízký	-	++		-
	Střední	+	++		-
	Vysoký	-	+		+

- nevhodné, + vhodné, ++ velmi vhodné

Praktické poznatky pro nitridaci

Ocel pro nitridaci by měla být vyžehána na snížení zbytkového napětí. Ocel by do procesu nitridace měla vstoupit zakalena a popuštěna na požadované vlastnosti. Pro zvýšení houževnatosti nitridické vrstvy je výhodné provést popuštění na 360 až 380 °C po dobu cca 60 min. Vhodný je dobře připravený povrch – broušením. Teplota při nitridování má být asi o 10 až 20 °C nižší, než byla teplota popouštění dílců po jejich zakalení. Obvykle bývá mezi 510 až 560 °C. Tloušťka nitridační vrstvy závisí na teplotě a na době nitridování.

Na konci nitridace, lze ještě provést povrchovou oxidaci, při teplotě ca. 520 °C, výsledkem je značné zvýšení korozivzdornosti.

Shrnutí výhod nitridace:

- Zvýšení odolnosti povrchu na otláčení (neplatí pro bodový styk součástí).
- Odolnost proti korozi.
- Rovnoměrná tloušťka vytvořené vrstvy bez nutnosti dalšího opracování.
- Snížení koeficientu tření.

3 Bezproudé niklování

Zdroje: [68] [69]

Bezproudé niklování nabízí vytvoření pravidelné vrstvy i při velmi složitých tvarech. Jedná se ve skutečnosti o povlaky na bázi NiP (sloučenina Ni₃P), přičemž obsah P, který je součástí lázně značně ovlivní výsledné vlastnosti povrchu. Tyto povlaky lze deponovat na ocel, litinu, Al a jeho slitiny, Cu a její slitiny. V některých případech lze deponovat i na keramiku, nebo plast.

Vlastnosti, které tyto povlaky nabízí:

- Vysoká korozivzdornost, v některých případech lze nahradit i „tvrdochrom“ (příčemž není nutno používat vysoce toxické a karcinogenní sloučeniny šestimocného Cr).
- Vynikající ořezivzdornost, součinitel tření s ocelí: 0,2 lubrikovaný až 0,4 bez maziva.
- Rovnoměrná tloušťka povlaku, který je vytvořen i na složitých plochách.
- Přijatelná pájitelnost (u povlaků s nižším obsahem P), nutnost použití kvalitní pájecí kapaliny.
- Je označován jako netoxický a vhodný i pro potravinářský a farmaceutický průmysl, na tomto místě je však nutno poznamenat, že u značné části populace Ni funguje jako silný alergen.
- Velmi malá adsorpce H₂, téměř 1/10 adsorpce u Cr povlaků.

Výsledné vlastnosti povlaků výrazně ovlivňuje obsah P. Tyto povlaky se obecně rozdělují do 3 kategorií:

- s nízkým obsahem P (1–3 %),
- se středním obsahem P (5–9 %),
- s vysokým obsahem P (9–15 %).

Galvanicky vyloučené vrstvy Ni jsou krystalické. Povlaky s nízkým obsahem P jsou mikrokrystalické. Se zvyšováním obsahu P jsou ultra jemně krystalické až amorfni, při obsahu nad 10,5 %. Toto tvoří nezanedbatelnou výhodu při hodnocení odolnosti proti interkrystalické korozi. Ni vyloučený elektrolýzou je na tento degradační vliv náchylný, ale u bezproudového tyto hranice chybí.

Obsah P má značný vliv na specifickou hmotnost. Zatímco čistý Ni vykazuje 8,9 gcm⁻³, NiP povlak s obsahem P 3 % 8,52gcm⁻³ a s obsahem 11% 7, 75g.cm⁻³.

Lázně NiP lze rozdělit podle typu použitého redukčního činidla, hodnoty pH lázně a pracovní teploty. Nejčastěji používané jsou slabě kyselé fosforanové elektrolyty (pH okolo 4,6, pracovní teplota 88 až 92 °C). Lázeň je velmi citlivá na katalytické látky. Následující jsou škodlivé i ve stopových množstvích Pb, Sn, Zn, Mo, Cd, Bi, As, Sb. Přítomnost těchto prvků stabilizuje Ni sloučeniny a znemožňuje jejich rozklad a tím i vytváření povlaku. Zejména je nutno vyhnout se použití pájených součástí (pájka obsahuje Sn a Pb). Lázeň pro vyloučení NiP povlaků je složena z následujících chemikálií:

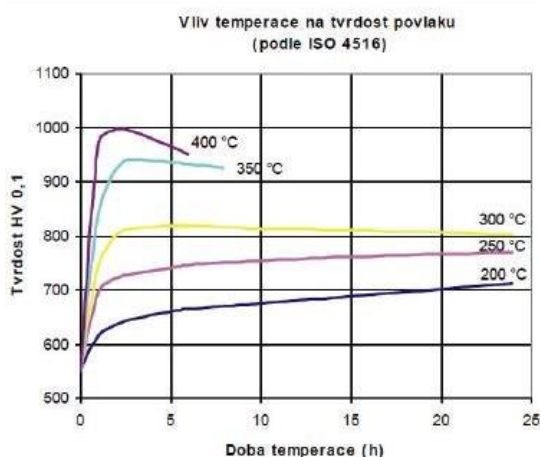
- zdroj niklu – nikelnatá sůl (síran, chlorid, uhličitan, octan) reduktor (fosforan),
- komplexní činidlo (octan, mléčnan, jantaran, pyrofosfát, aminoocan, citran),
- aktivátor pro zvýšení účinnosti reduktoru (dikarbonové kyseliny, fluoridy, tartaráty),
- regulátor pH (pufr),
- smáčedlo (ionogenní a neiogenní látky).

Tepelné zpracování NiP povlaků

Povlaky vytvořené bezproudým niklováním jsou bezprostředně po depozici křehké, nedostatečně tvrdé s velmi malou otěruvzdorností. Pro zlepšení mechanických vlastností je nutno provést tepelné zpracování. Mechanismus tepelného zpracování spočívá ve změně rozložení P, jeho distribucí do povrchu a vytvoření difúzní vrstvy a snížením porózy vytvořené vrstvy, to má za následek i zvýšení tvrdosti a výrazně zlepšeny jsou adhezní vlastnosti.

Postup při tepelném zpracování NiP povlaků:

1. Ohřev na určenou teplotu (obvykle 400 °C)
2. Udržení na teplotě (obvykle 1 hodinu)
3. Ochlazení na teplotu okolí



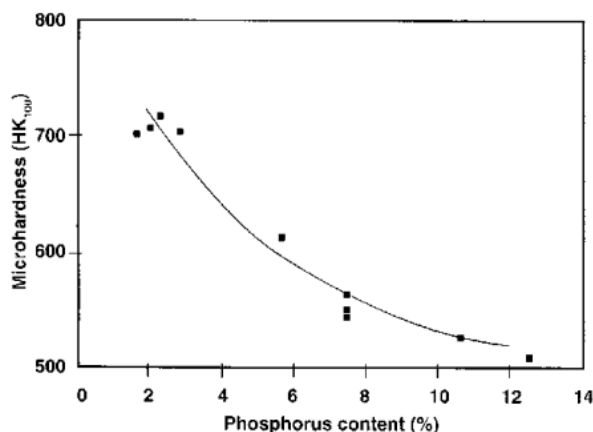
Obr. P- 5: Tepelné zpracování NiP povlaků [69]

Pomocí rentgenové difrakce bylo zjištěno, že pomocí tepelného zpracování dochází k tvorbě krystalitů a tvorbě dvou fází, čistého Ni kovu a fáze Ni₃P. Pokud se tedy v povlaku objeví trhliny (zřejmě díky smrštění), budou nejspíše koncentrovány do oblasti obohacené P.

V případě nanášení vrstvy pomocí galvanické metody dochází k nepravidelnému nanášení vrstvy z důvodu problémů s distribucí proudu. Tento problém nastane, pokud bude součást velmi složitá. V případě přítomnosti nepravidelných kapes, otvorů zejména neprůchozích je výhodné použít *bezproudé niklování*, které na tomto fyzikálním jevu není závislé. V případě galvanické technologie je nutno na všechna riziková místa používat pomocné anody, které je nutné umístit naproti kritickým místům, což proces depozice činí velmi náročným na technologickou kázeň. V případě bezproudého Ni procesu, pokud je dodržena předepsaná teplota, pH a složení lázně, je předpoklad dosažení kvalitního výsledku.

Tvrdość NiP povlaků

Důležitou vlastností Ni povlaků je tvrdost. V tepelně nezpracovaném stavu je tvrdost silně závislá na obsahu P. Tvrdość lze výrazně ovlivnit tepelným zpracováním. V případě galvanického Ni tvrdost silně klesá s tepelným zpracováním, což je ovlivněno růstem zrn a rekrytalizací. V případě bezproudého NiP povlaku tvrdost naopak stoupá a může dosahovat až tvrdosti Cr.



Obr. P- 6: Tvrdość NiP povlaků v závislosti na obsahu P v tepelně nezpracovaném stavu [68]

Zvýšené tvrdosti lze dosáhnout i při nižších teplotách, je však nutné použít delší časový úsek pro TZ. Vytvrzovací fáze vytváří fázi Ni₃P, která je velmi tvrdá. Pokud jsou tepelně zpracovány

povlaky s nízkým obsahem P, s délkou TZ jejich tvrdost klesá. Tvrdost lze kontrolovat ve značně širokém rozsahu, ale je nutno mít na paměti, že se stoupající tvrdostí klesá jejich korozní odolnost.

NiP povlaky vykazují velmi dobrou otěruvzdornost. Ta je zapříčiněna vysokou tvrdostí a přirozenými lubrikačními vlastnostmi povlaku. Tato lze ještě zvýšit přidáním tvrdých částic, například na pracovišti KMM byl poměrně úspěšně aplikován nanodiamant. Jinou možností je přidání kluzných částic jako komponentu povlaku. Zde se úspěšně uplatní například PTFE, grafit nebo MoS₂. Lze vytvářet i povlaky s dalšími kovy, jako B, nebo Co.

Praktické poznatky pro depozici NiP povlaků

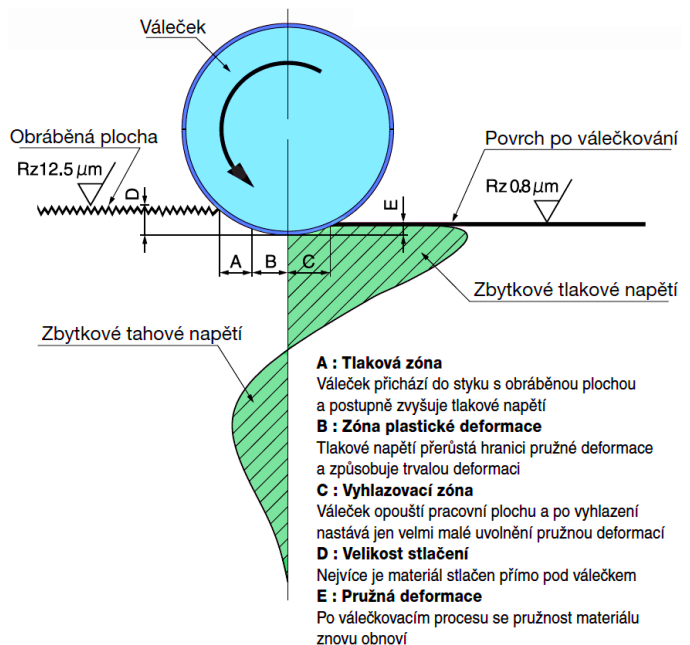
Praktická depozice spočívá zejména ve velmi důkladné předúpravě povrchu. Vzhledem k tomu, že tloušťka povlaku je relativně nízká, rýhy po předchozím neopatrném obrábění pravděpodobně nebudou skryty, ale naopak spíše zvýrazněny. Zvláště nepříznivě se projeví případná koroze substrátu. Nejpriznivější cestou je zřejmě citlivé vyleštění.

4 Válečkování

Zdroje: [70] [71] [72]

Válečkování je dokončovací metoda bez úběru materiálu. Dochází zde ke zpevnování povrchové vrstvy důsledkem plastické deformace vyvolané přítlačnou silou tvářecího elementu (obr. 51). Jako tvářecí elementy se nejčastěji používají válečky nebo kuličky v závislosti na upravovaném povrchu. Kromě zpevnování dochází také ke zvyšování nosného podílu povrchu a s tím spojené hodnoty drsnosti. Nejvýraznější zpevnění lze vypočítat u tvárných kovů. Válečkují se primárně rotační vnější a vnitřní plochy. [70]

Omezení z hlediska vhodného materiálu je primárně hodnotou tvrdosti, protože válečkování materiál nesmí být tvrdší než 40 HRC. Dále pak pevností menší než 1250 MPa a výchozí drsností povrchu Ra menší než 3,2 μm. Dosahovanou tvrdost po válečkování by bylo nutné ověřit praktickými testy nebo experimentálně v závislosti na použitém materiálu obrobku.



Obr. P- 7: Válečkování [70]

Dosahované parametry:

- Zmenšení rozměru součásti o 0,01 až 0,05 mm v závislosti na průměru.
- Rozměrová přesnost IT6 až IT8.
- Drsnost Ra 0,05 až 0,4 μm .
- Hloubka zpevnění povrchové vrstvy až 0,1 mm.

Výhody válečkování:

- Zvýšení pevnosti a meze únavy.
- Zvýšení tvrdosti.
- Zvýšení odolnosti proti korozi.
- Zvýšení nosného podílu profilu.
- Přeměna tahových zbytkových napětí na příznivé tlakové.

V současné době není otázka válečkování tvarových ploch dostatečně popsána pro případné praktické použití. Pokud to bude racionální, může být tato problematika rozšířena v druhé (optimalizační) fázi praktické části disertační práce [70]

5 Omílání

Zdroje: [73] [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80]

Prakticky v každém výrobním procesu (lití, lisování, řezání, ale i obrábění), vznikají nerovnosti, otřepy a znečištění povrchu výrobků. Jednou z technologií, které by minimalizovali tyto povrchové defekty (popřípadě je rovnou odstranili), je i omílání.

Technologie omílání se používá především v případech, kdy by jiný způsob dokončovacích metod leštěním byl drahý, velmi pracný, nebo velmi obtížně proveditelný. Hladký povrch je požadován u řady obrobků – např. u turbínových lopatek, tryskových motorů, u šnekových převodů, u ložisek atd. Speciální procedury na bázi základní technologie omílání umožňují nahradit drahou ruční prací při leštění, a to při stejné nebo mnohdy i lepší technické kvalitě.

Všechny metody omílání pracují na principu tření a nárazech obrobku o abrazivum (tělíska ve formě keramiky, plastu apod.). Tím dochází k úběru materiálu.

Technologie omílání může mít dvě podoby:

- *Suché omílání* (v procesu se nachází pouze abrazivum pro suché omílání)
 - Příkladem je vlečné omílání při použití ořechových skořápek.
- *Mokrý omílání* (např. u odstředivého omílání za použití provozních kapalin v kombinaci s abrazivem z nerezové oceli)

Metody omílání

Odstředivé omílání

U této technologie je důležitý rotační pohyb, který uvádí brusné nebo leštící abrazivo společně s daným obrobkem do prstencového proudění. Odstředivá síla, která působí při omílání, zapříčiní pohyb omílacích tělísek směrem vzhůru podél obvodu pracovního prostoru až místa bodu, kdy mají tyto tělíska nulovou kinetickou energii. V tomto místě pak na abrazivní tělíska opět začne působit gravitace a tím pádem spadnou zpět na základní talíř ve spodku nádoby. Tímto neustálým abrazivních tělísek dochází k velmi intenzivnímu tření / broušení.



Obr. P- 8: Odstředivé omílání [75]

Tato metoda se používá nejen u intenzivního zaoblování hran, ale i pro velmi jemné vyhlazení povrchu u speciálních dílů a součástí.

Vlečné omílání

Při technologii vlečného omílání výrobky vykonávají planetový pohyb v nádobě s brusným nebo leštícím abrazivem. Toho je docíleno kombinací rotačního pohybu držáků na výrobky souběžně s otáčením výrobků kolem své osy.

Díky vysokým rychlostem pak dochází k vyvození velkého přitlačného tlaku, vznikajícího mezi výrobkem a médiem.

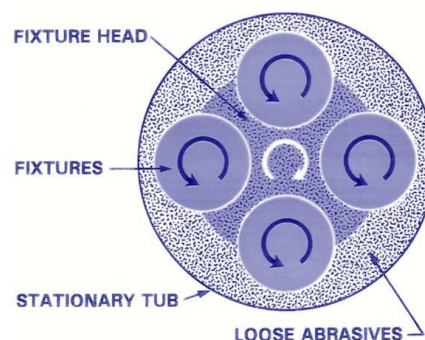
Tato technologie dosahuje kvality srovnatelné s ručním leštěním, ale v podstatně kratším čase. Měnitelná hloubka ponoru výrobku do media a rychlost rotačního pohybu umožňují až 4x vyšší intenzitu omílání v porovnání s odstředivým omíláním.

Metoda je vhodná zejména pro výrobky, které jsou náchylné na poškození při vzájemném dotyku omílaných součástí (monolitní řezné nástroje, VBD nástrojů ale i různé součásti leteckého a energetického průmyslu)

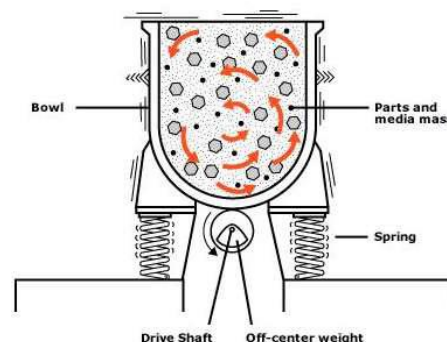
Vibrační omílání

U technologie vibračního omílání vzniká v pracovní nádobě tření mezi výrobkem a abrazivem díky vibracím. Rychlost vibrace se dá měnit díky frekvenčnímu měniči. Tam, kde kvůli rozměrům omílaných součástí nevyhovují kruhové vibrátory, se používá vibračních žlabů.

Tato technologie se používá u výrobků, které jsou náchylné k poškození. Díky přepážkám lze obrábět



Obr. P- 9: Princip vlečného omílání [76]



Obr. P- 10: Princip vibračního omílání [77]

obrobky bez vzájemného dotyku. Výrobky, které se omílají touto technologií, jsou např. ozubená kola, elektrosoučástky, ortopedické implantáty.

Proudové omílání

Proudové omílání je na první pohled velice podobné vlečnému omílání. Na rozdíl od vlečného omílání, kde hlavní pohyb koná výrobek, ale u proudového omílání koná hlavní (rotační) pohyb válcová nádoba naplněná abrazivem. Výrobky jsou upnuté, jako u vlečného omílání, v držácích. To znamená, že při procesu omílání se výrobky nikdy mezi sebou nedotknou. Navíc je možné (tak jako i u vlečného omílání) výrobky naklápět pod různým úhlem. Díky speciálním držákům se výrobky mohou také otáčet kolem vlastní osy. To má za následek lepší přístup abraziva do jinak špatně přístupných míst omílaných výrobků. Díky tomuto naklápění (a také díky konstantní rotaci pracovní nádoby a samotného nástroje kolem vlastní osy) se touto technologií omílají především vrtací a frézovací nástroje, a to z důvodu rovnoměrného omílání drážky nástroje.

ISF

ISF® je zkratka pro izotropické superfinišování – chemicky urychlené omílání. Tato technologie je patentovaná firmou REM Chemicals, Inc., (USA).

Technologie ISF® je optimální kombinací chemického a mechanického opracování povrchů. Kyselá aditiva na opracovávaných obrobkách nejdříve vytvoří tenkou oxidovanou vrstvu, která se následně opět odstraní brusnými tělísky, která jsou optimalizovaná pro konkrétní obrobky. Touto technologií lze dosahovat velmi jemných povrchů (s hodnotami drsnosti po finální úpravě až $R_a = 0,02 \mu\text{m}$, $R_z = 0,14 \mu\text{m}$), které mají za následek snížení odvalovací a pohybové hlučnosti konstrukčních dílů, snížení tření a s ním spojené spotřeby energie a prodloužení servisních intervalů a životnosti.

Používá se zejména v oblastech letectví a kosmonautiky, při výrobě motorů a závodních strojů, v lékařské technice a u přesných výrobků.

Rozbor používaných abraziv

Abraziv existuje celá řada tvarů, rozměrů i materiálů. Keramická i plastová tělíška mají tvar elips, válečků, kuliček, trojúhelníků, hvězdiček, čoček atd. Abraziva jsou rozdílná pro mokré a suché omílání. Na dobu omílání má kromě zvolení vhodného abraziva vliv i zrnitost daného abraziva.

Abraziva pro suché omílání

- Ořechové skořápky
- Granule pro suché dokončování
- Kukuřičný granulát

Abraziva pro mokré omílání

- Plastické lešticí tělesa
- Keramické abrazivum
- Abrazivum z nerezové oceli
- Zirkonové kuličky



Obr. P- 11: Kukuřičný granulát [89]

- Lešticí pasta pro mokré omílání

Aktivní kapaliny pro mokré omílání => Přidávají se do procesu s požadovaným množstvím vody. Přilévá se 1-5% vody. Tato výsledná sloučenina má následující úkoly: při procesu zajistit čistotu omílaných součástí, odmašťování a prevence proti oxidaci povrchu, dosažení světlejšího povrchu obrobků, udržování čistého abraziva.

6 Tryskání bez úběru materiálu

Zdroj: [70]

Tato metoda je založena na ostřelování upravovaného povrchu vysokou rychlostí sférickými neabrazivními částicemi z různých materiálů. Pro dosažení požadovaného efektu zpevnění povrchu, a ne pouhého očištění (známé jako pískování) mají tyto materiály vyšší hmotnost. Z pracovních podmínek výsledný povrch ovlivňuje rychlost a směr dopadu částic. [70]

Dle použitých částic se nazývají i příslušné operace:

Kuličkování – ocelové kuličky o průměru 0,3 až 3 mm z měkké, kalené nebo korozivzdorné oceli.

Balotinování – skleněné kuličky o průměru 0,03 až 0,8 mm.

Tryskání keramickými kuličkami a další.

Výhodou ocelových kuliček je vyšší pevnost, avšak s negativním zanecháváním stop po nárazu. Keramické a skleněné kuličky stopy nezanechávají, ale po nárazu se do značné míry deformují a je nutné pro další aplikaci takto poškozené elementy odstranit. [70]

Hlavní charakteristiky metody:

Drsnost povrchu v rozmezí Ra 0,8 až 1,6 μm závisí na vstupních hodnotách (např. Ra 6,3 μm se zlepší na 0,8 μm , ale Ra 0,2 μm se zhorší na 0,4 μm při stejných podmínkách.

Vznik pozitivního tlakového zbytkového napětí v povrchové vrstvě součásti, které má vliv na mechanické namáhání, odolnost proti otěru nebo korozi.

Hloubka zpevnění 0,05 - 0,5 mm.

Přesnost rozměrů a tvarů zůstává téměř nezměněna.

7 Laserové navařování

Zdroje: [81] [82] [83] [84]

Technologie laserového navařování se s úspěchem používá při opravách forem a zápusťek. Umožňuje na povrchu součásti vytvářet specifické povrchy nezávislé na základním podkladovém materiálu.

Princip navařování pomocí laserových přístrojů spočívá ve vybuzení laserového paprsku přes zábleskovou výbojku pomocí krystalu Nd:YAG. Pulzní laser má délku vlny 1064 nm. Dráha

laserového paprsku probíhá přes soustavu zrcátek a optických čoček až k výrobku. Tento systém se nachází v uzavřeném robustním krytu a je tak netečný vůči tepelným výkyvům a mechanickým vlivům. Laserová technologie otevřela novou cestu precizního navařování, při jehož vývoji byla bezpečnost obsluhy a ostatních osob prioritní záležitost, což se odráží především ve vývoji uzavřených laserů Cronitex, které nemají žádné zvýšené nároky na ochranné osobní pomůcky, především oči. V uzavřených laserech lze navařovat obrobky až 350 kg těžké a u strojů s otevřenou pracovní kabinou i obrobky podstatně těžší. Ochranný plyn přiváděný do místa navařování zaručuje vytvoření hladkého návaru bez pórů. Nastavitelná optika pro tvorbu laserového paprsku umožňuje vytvořit bezvrubý (plynulý) návar na hranách, strmých plochách, v koutech a na hlubokých tvarech bez nahřátí a následné deformace obrobku a také bez nutnosti měnit během práce polohu navařovaného obrobku. Integrované chlazení laserového paprsku garantuje stabilní výkon takovýchto přístrojů. [81]

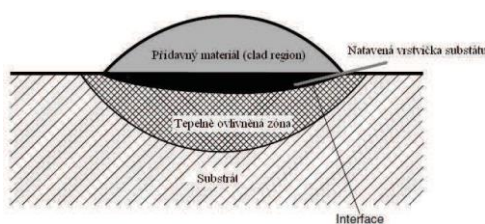


Obr. P- 12: Laserový systém ACP02 od firmy MEPAC CZ [83]

Laserový paprsek dokáže navařovat mnoho druhů materiálů jako oceli, slitiny titanu, niklu, hliníku, hořčíku, mědi a další. Podobně jako další technologie využívající laser je lze snadno zautomatizovat s použitím robotů. [81]

Výhody:

- Příprava vysoce kvalitních vrstev v celém spektru materiálových vlastností pro požadovaný povrch (tvrdost, odolnost proti otěru, korozi nebo teplotě).
- Řízení tloušťky návaru s nízkou porozitou.
- Nízké tepelné ovlivnění součásti oproti konvenčnímu navařování.
- Prodloužení životnosti součásti.



Obr. P- 13: Schéma vzniklých oblastí materiálu při procesu laserového navařování [84]

8 Žárový nástřik

Zdroje: [84] [85] [86]

Žárový nástřik je částicový proces vytváření povlaků o tloušťce obvykle větší než 50 μm , kdy je nanášený materiál ve formě prášku (případně drátu) přiváděn do zařízení, kde dojde k jeho natavení. V důsledku kinetické síly materiálu či rychlosti média dochází k urychlení směrem k

povlakované součásti. Po dopadu na substrát dojde k výraznému plošnému rozptýlení částice a k jejímu rychlému přechodu do tuhého stavu. Tím se vytváří povlak s charakteristickou lamelární strukturou a specifickými vlastnostmi.

Tradiční aplikace žárově stříkaných povlaků se zaměřují především na ochranu povrchů. V současné době se ale objevují aplikace používající povlaky jako funkční povrchy nabízející materiálovým inženýrům alternativu mezi používáním tenkých vrstev a objemových materiálů.

V řadě případů – energetika, automobilový průmysl, letecký průmysl, chemický a petrochemický průmysl, lékařství – jsou technologie žárově stříkaných povlaků nezastupitelné a sehrávají klíčovou roli při výrobě. Jejich praktický dopad na kvalitu výrobků spočívá v technickém a ekonomickém zvyšování užitečných vlastností jak v prvovýrobě, tak i v oblasti renovací.

Zdrojem tepelné energie, nutné k nastavení přídavného materiálu, může být buď spalovací proces, nebo elektrická energie. Podle konstrukce zařízení a použitého zdroje energie lze rozlišit základní druhy žárového nástřiku: nástřik plamenem, HVOF (High velocity oxy-fuel coating spraying – vysokorychlostní nástřik plamenem), plazmatický nástřik a nástřik elektrickým obloukem. [85]

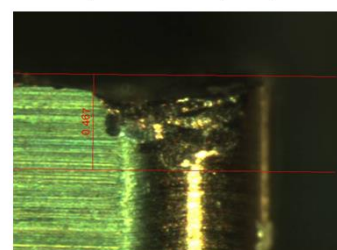
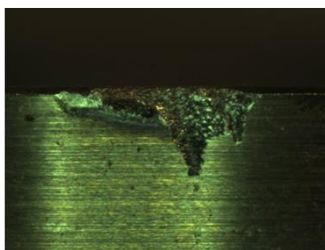
Obrobitelnost nástřiků a návarů nástroje s definovatelnou geometrií řezného břitu je sama o sobě špatná a při obrábění na tvarové ploše ještě horší, a proto je zde veliký potenciál pro možné zlepšení situace v budoucnu. KTO, resp. RTI se na tuto oblast zaměřuje ve výzkumném programu RTI 4 se specializací právě na obrábění tvarově složitých ploch.

První experimenty obrábění žárového nástřiku již v tomto programu proběhly – viz obr. 58. Z obr. 58 je patrné, že u nástroje s kruhovou destičkou je příliš negativní geometrie. V náhledu, který je červeně orámován je vidět, že nedošlo k zaříznutí břitu – patrné odtlačení. Materiál Cr3C2 je těžkoobrobitelný. Po vyhodnocení kapilární zkoušky bylo zjištěno, že při obrábění docházelo vytrhávání tvrdých částic z povrchu, nikoliv k jejich „přeříznutí“. [86]



Stellite 6 - RINGN43-LX11-TUNGALOY
Vc=250 m/min f=0.025 mm/rev ap=0.1 mm

Cr3C2-25%NiCr – SNGN LX11 –
Vc=150 m/min f=0.15 mm/rev ap=0.15 mm



Obr. P- 14: Soustružení žárového nástřiku (vlevo Stellite 6, vpravo Cr3C2-25% NiCr [86])

Příloha 3: Prvotní výběr technologií pro dosažení požadavků na funkční plochy

Zdroj: [41]

V úplném počátku výzkumu byla za účelem řešerše povrchových úprav vypracována diplomová práce na téma *Návrh a ověření technologie výroby klíčových komponentů samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska*. [41] Tato a následující příloha mapuje výsledky této diplomové práce.

Rozhodovací kritéria:

K1 (povrchová tvrdost)

K2 (dostupnost vzhledem k sídlu společnosti)

K3 (nutnost strojní dokončovací operace – broušení, obrábění ...)

K4 (dosahovaná hloubka zpevnění povrchové vrstvy)

Tab. P- 3: Rozhodovací tabulka technologií

Bodovací stupnice a váhy kritérií (K)

bodů	K1	K2	K3	K4
0	< 50 HRC	≥ 15 km	vyžaduje	< 0,3 mm
1	≥ 50 HRC	< 15 km	nevyžaduje	≥ 0,3 mm
váhy	4	1	2	3

Materiál + TZ	Technologie	Kritérium				celkové body
		K1	K2	K3	K4	
ocel třídy 12 + QT	nitridace v plynu	0	1	1	1	6
	laserové povrchové kalení	1	1	1	1	10
	objemové kalení	1	1	0	1	8
	cementace + objemové kalení	1	1	0	1	8
	nitrocementace	1	1	0	1	8
	karbonitridace	0	1	1	1	6
	válečkování	0	0	1	0	2
	tryskání bez úběru materiálu	0	1	1	0	3
laserové navařování	1	1	0	1	8	
ocel třídy 15 a 16 + QT	nitridace v plynu	1	1	1	1	10
	laserové povrchové kalení	1	1	1	1	10
	objemové kalení	1	1	0	1	8
	cementace + objemové kalení	1	1	0	1	8
	nitrocementace	1	1	0	1	8
	karbonitridace	1	1	1	1	10
	válečkování	0	0	1	0	2
	tryskání bez úběru materiálu	0	1	1	0	3
laserové navařování	1	1	0	1	8	

Na základě rozhodovací tabulky byla vybrána technologie nitridace a laserového povrchového kalení. Ocel třídy 12 nebude nitridována z důvodu nedosažení požadované tvrdosti povrchové vrstvy.

Příloha 4: Procesní zhodnocení vybraných technologií povrchového zpevnění

Zdroj: [41] [87]

Procesní zhodnocení zahrnuje jednotlivé dílčí měření drsnosti a tvrdosti funkčních ploch, dále pak odchylek od jmenovitého tvaru modelu a odchylek jmenovitého rozměru výšky vahadel.

Drsnost (Ra) funkčních ploch nebyla výrazně zhoršena. Rozdíly hodnot jsou pouze v řádu 0,01 μm .

Měřením tvrdosti u prvního nitridovaného vzorku byla zjištěna výrazně nižší tvrdost než předpokládaná (až 600 HV). Možnou záměnu materiálu polotovaru však lze vyvrátit použitými řeznými podmínkami při obrábění a ověřujícím měřením tvrdosti po obrobení. Pro úplné vyloučení možné záměny materiálu byla nitridace provedena znovu. Opětovné měření záměnu materiálu zcela vyvrátilo. Naměřené hodnoty tvrdosti byly okolo 570 HV10. Pokles tvrdosti mohl být důsledkem předchozího stavu po tepelném zpracování polotovaru a stupni prokování, který má vliv na velikost zrna. Velikost zrna značně ovlivňuje difúzní proces. Vzniklá povrchová vrstva nitridů mohla být velmi slabá a možným nešetrným způsobem leštění byla poté degradována. Pro ověření hloubky nitridované vrstvy by bylo vhodné provést měření průběhu tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

Vyhodnocení odchylek vahadel od jmenovitého tvaru modelu bylo provedeno pomocí funkce průměrná odchylka. Vahadla byla seřazena podle nejmenších odchylek a výsledné zhodnocení bylo omezeno pouze na jednotlivé použité technologie nitridace a laserového povrchového kalení. Nitridovaná vahadla dosáhla menších odchylek.

Procesní zhodnocení bylo provedeno metodou bodovací a metodou váženého součtu.

Pro obě metody byla použita níže uvedená kritéria:

- K1 (celková cena vybrané varianty uvedená v ekonomickém zhodnocení)
- K2 (změny odchylek bodů od jmenovitého tvaru modelu)
- K3 (tvrdost funkčních ploch)
- K4 (doba procesu)¹⁰
- K5 (třída obrobitelnosti materiálu podle ČSN)

¹⁰ Dobou procesu je myšlen proces od nákupu materiálu po hotovou součást. Délka procesu u variant 1, 2 a 4 je 6 týdnů; u variant 3 a 5 je 7 týdnů.

Stanovení vah jednotlivých kritérií bylo provedeno pomocí metody pořadí podle dvou níže uvedených preferencí kritérií. Preference kritérií pro stanovení vah A upřednostňuje celkovou cenu. Druhá varianta upřednostňuje tvrdost funkčních ploch. [87]

Tab. P- 4: Stanovení vah preference kritérií A [41]

A
 Preference kritérií:
 K1 > K3 > K2 > K5 > K4

Stanovení vah kritérií **A**

pořadí kritérií	body	váha
K1	5	0,33
K3	4	0,27
K2	3	0,20
K5	2	0,13
K4	1	0,07
Celkem	15	

Tab. P- 5: Stanovení vah preference kritérií B [41]

B
 Preference kritérií:
 K3 > K1 > K2 > K5 > K4

Stanovení vah kritérií **B**

pořadí kritérií	body	váha
K3	5	0,33
K1	4	0,27
K2	3	0,20
K5	2	0,13
K4	1	0,07
Celkem	15	

Jednotlivé váhy pro obě hodnotící metody jsou vypočteny podle níže uvedeného vzorce [87]:

$$váha_j = \frac{body_j}{\frac{n(n+1)}{2}} ; j = 1, 2, \dots, n ; n = \text{počet kritérií}; j = \text{číslo kritéria}$$

Pro vyhodnocení jsou použita maximalizační kritéria. Nejlepší varianta z hlediska procesního zhodnocení bude s nejvyšší hodnotou celkových bodů (resp. funkce užitku).

Varianty:

- Varianta 1 = Vahadlo z nelegované zušlechtěné oceli (ocel třídy 12. dle ČSN) povrchově kalené laserem
- Varianta 2 = Vahadlo z nitridované chrom-molybdenové zušlechtěné oceli (ocel třídy 15. dle ČSN)
- Varianta 3 = Vahadlo z chrom-molybdenové zušlechtěné oceli (ocel třídy 15. dle ČSN) povrchově kalené laserem
- Varianta 4 = Vahadlo z nitridované chrom-nikl-molybdenové zušlechtěné oceli (ocel třídy 16. dle ČSN)
- Varianta 5 = Vahadlo z chrom-nikl-molybdenové zušlechtěné oceli (ocel třídy 16. dle ČSN) povrchově kalené laserem

Bodovací metoda [87]

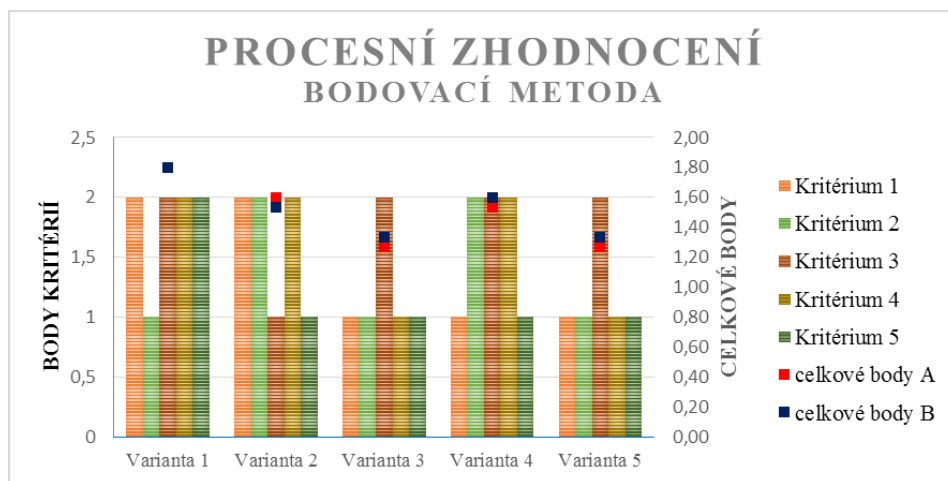
Bodovací metoda představuje jednoduché vyhodnocení podle přiřazených bodů jednotlivým variantám (vahadlům 1 až 5). V porovnání s další použitou metodou váženého součtu nezachycuje změny výsledných hodnot jednotlivých kritérií. Váhy kritérií jsou uvedeny v tabulce (Tabulka P-16). [87]

Tab. P- 6: Bodovací stupnice kritérií [41]

Bodovací stupnice kritérií					
body	cena K1	odchylky K2	tvrdost K3	čas procesu K4	obrobitelnost K5
1	30 tis. Kč a více	velké	méně než 600 HV (včetně)	více než 6 týdnů	1b - 11b
2	méně než 30 tis. Kč (včetně)	malé	více než 600 HV	méně než 6 týdnů (včetně)	12b - 20 b

Tab. P- 7: Bodovací metoda [41]

Varianta	Kritérium					váhy A		váhy B	
	K1	K2	K3	K4	K5	body	pořadí	body	pořadí
Varianta 1	2	1	2	2	2	1,80	1.	1,80	1.
Varianta 2	2	2	1	2	1	1,60	2.	1,53	3.
Varianta 3	1	1	2	1	1	1,27	4.	1,33	4.
Varianta 4	1	2	2	2	1	1,53	3.	1,60	2.
Varianta 5	1	1	2	1	1	1,27	4.	1,33	4.



Obr. P- 15: Procesní zhodnocení – bodovací metoda [41]

Nejlépejší varianta stanovená pomocí bodovací metody při preferenci ceny i tvrdosti funkčních ploch je **varianta číslo 1** (laserově povrchově kalená vahadla z oceli třídy 12). Na čtvrtém místě se umístily dvě varianty (číslo 3 a 5).

Tento materiál má dobré předpoklady pro splnění požadavků na funkční plochy. Zvolené kritéria pro hodnocení jsou ovšem velmi obecná a pro splnění například tvrdosti funkčních ploch stačí pouze procentuální obsah uhlíku v oceli. Pro nasazení této varianty do sériové výroby bude vhodné podložit zvolené řešení dalšími detailními testy. Pokud budou mít tyto testy uspokojivé výsledky, není nutné používat drahé, těžko obrobitelné materiály.

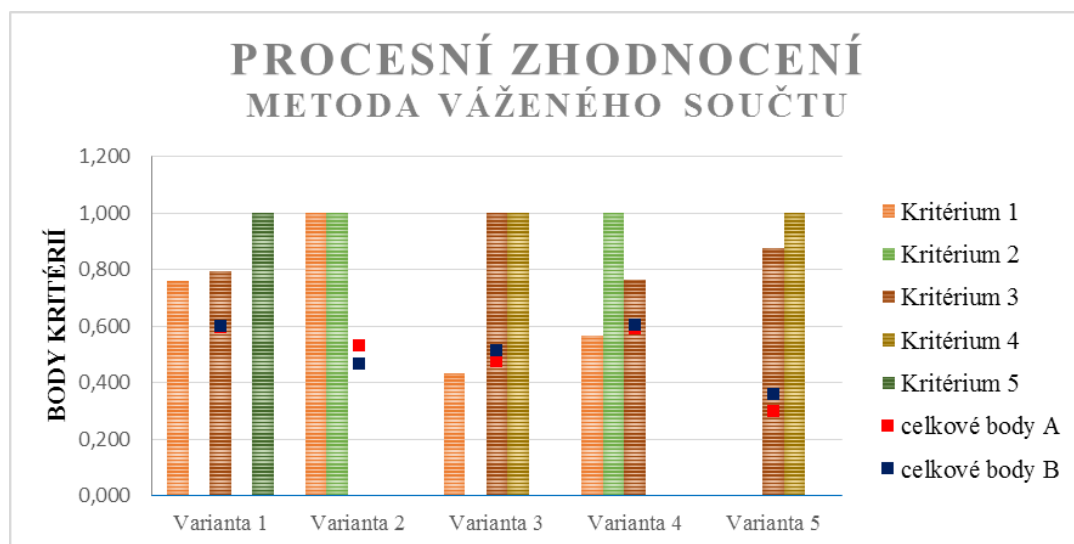
Metoda váženého součtu [87]

Metoda váženého součtu zohledňuje různé bodovací stupnice pro každé kritérium. Lze tedy použít body nebo přímo hodnoty tvrdosti, cen, počtu týdnů atd. jednotlivých variant. Tato metoda je důvěryhodnější než metoda bodovací, neboť lépe zachycuje změny výsledných hodnot jednotlivých kritérií. Váhy kritérií jsou uvedeny v tabulce (Tabulka P-17).

Tab. P- 8: Metoda váženého součtu [41]

Varianta	Kritérium					váhy A		váhy B	
	K1	K2	K3	K4	K5	u(Ai)	pořadí	u(Ai)	pořadí
Varianta 1	0,761	0,000	0,794	0,000	1,000	0,599	1.	0,601	2.
Varianta 2	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,533	3.	0,467	4.
Varianta 3	0,435	0,000	1,000	1,000	0,000	0,478	4.	0,516	3.
Varianta 4	0,565	1,000	0,765	0,000	0,000	0,593	2.	0,606	1.
Varianta 5	0,000	0,000	0,877	1,000	0,000	0,300	5.	0,359	5.

$u(A_i)$ = agregovaná funkce užítku



Obr. P- 16: Procesní zhodnocení – metoda váženého součtu

Nejllepší varianta stanovená pomocí metody váženého součtu při preferenci ceny je **varianta číslo 1** (laserově povrchově kalená vahadla z oceli třídy 12). Při preferenci tvrdosti funkčních ploch vyhrála **varianta číslo 4** (nitridovaná vahadla z oceli třídy 16). Výsledné hodnoty prvních dvou pozic pro stanovení pořadí jsou si velice podobné. Tento fakt může být způsoben právě detailnějším zhodnocením výsledků jednotlivých kritérií. Pokud srovnáme první dvě pozice pořadí obou preferencí je patrná záměna jejich pořadí.

Výsledné hodnocení prvních dvou pozic pořadí s přihlédnutím k metodě bodovací lze stanovit následovně:

Varianta 1 (laserově povrchově kalená vahadla z oceli třídy 12)

Varianta 4 (nitridovaná vahadla z oceli třídy 16)

Příloha 5: Definice vybraných pojmů statistického plánování experimentu

Zdroje: [50] [53] [88]

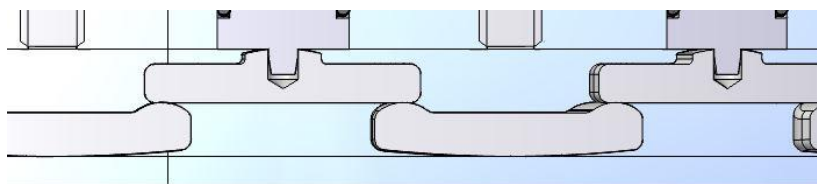
Níže seznam pojmů, které jsou důležité pro bezchybné pochopení postupu sestavení plánu experimentu vč. volby jeho typu [88]:

- **Spojité proměnná** – ve zvoleném intervalu může nabývat libovolných hodnot.
- **Diskrétní (kategoriální) proměnná** – nabývá konečného počtu hodnot.
- **Závisle proměnná** – výstupní (cílová) proměnná, která je závislá na vstupní veličině (např. posuvová síla, krouticí moment...).
- **Nezávisle proměnná** – vstupní veličina ovlivňující výstupní závisle proměnnou (např. řezná rychlost, průměr nástroje, otáčky...).
- **Blokové uspořádání plánu** – celý plán experimentu (např. centrální kompozitní plán) je rozdělen na samostatné bloky, které jsou definovány např. druhem materiálu.
- **Signifikantní** – statisticky významný.
- **Statistická hypotéza** – tvrzení, které se týká neznámé vlastnosti rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné nebo jejích parametrů. [53]
- **Nulová hypotéza H_0** – hypotéza, jejíž platnost je ověřována.
- **Alternativní hypotéza H_1** – hypotéza, která je postavena proti nulové hypotéze.
- **Statistické testy** – postupy, kterými se prověřuje platnost nulové hypotézy. Na základě těchto testů se pak hypotéza buď přijme, nebo odmítne. [53]
- **Testovací kritérium** – náhodná veličina závislá na náhodném výběru mající vztah k nulové hypotéze. [53]
- **Hladina významnosti α** – stanovuje hranici pro zamítnutí nebo přijmutí nulové hypotézy, kdy hladina významnosti se běžně ve strojírenství stanovuje na 5 % a.
- **reziduum** – rozdíl mezi měřenou experimentální hodnotou a hodnotou vypočtenou modelem.
- **pravděpodobnost p (p-value)** – hodnota, na jejímž základě je zamítnuta nebo nezamítnuta nulová hypotéza pro stanovenou hladinu významnosti α .
- **Faktor** – nezávisle proměnná, která vstupuje do experimentu. Faktory je možné rozdělit do tří základních skupin, a to na kontrolované, konstantní a náhodné.
- **Kontrolovaný faktor** musí splňovat následující podmínky dle pramenu [50]:
 - musí být říditelný, to znamená, že je v průběhu experimentu konstantní nebo se mění předem daným způsobem,
 - není funkcí jiných faktorů,
 - musí být technicky řešitelný, a to včetně jejich kombinací,
 - musí být nezávislý, to znamená, že kterýkoliv faktor nabývá všech hodnot bez ohledu na hodnoty ostatních faktorů,
 - podle typu zvoleného plánu (např. centrální kompozitní plán) se musí jednat o spojitou proměnnou.

Příloha 6: Rozřazovací jednoduchý test na ověření kinematické funkčnosti ložiska

1 Měření 1. konstrukčního návrhu geometrie vahadel

Prvotní návrh vahadel byl koncipován v kontaktech mezi vahadly „*rádus na plochu*“+ „*rádus na plochu*“ s velkým rádiusem spodním pro odvalování – viz obr. P-3.



Obr. P- 17: 1. konstrukční návrh geometrie vahadel

Tab. P- 9: Tabulka s hodnotami měření 1. konstrukčního návrhu geometrie vahadel

Zatěžovaný kvadrant	Vychýlení v kvadrantu A [mm]	Vychýlení v kvadrantu B [mm]	Vychýlení v kvadrantu C [mm]	Vychýlení v kvadrantu D [mm]	Úhel vychýlení [°]
Kvadrant A	0,18	Nesledováno	0,1	Nesledováno	0,031
Kvadrant B	Nesledováno	0,15	Nesledováno	0,07	0,024
Kvadrant C	0,07	Nesledováno	0,18	Nesledováno	0,028
Kvadrant D	Nesledováno	0,08	Nesledováno	0,2	0,031
Průměr					0,029

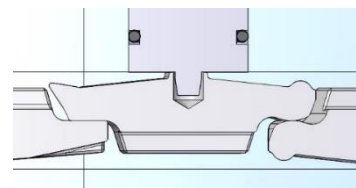
Diskuze nad výsledky

Z naměřených hodnot je patrné, že vahadlový systém nefungoval správně. Hodnoty vychýlení $0,07 \div 0,2$ znamenají úhel vychýlení $0,024^\circ \div 0,031^\circ$. To je o řád nižší úhel, než je požadován.

Vzhledem k výrazným rozdílům mezi vychýleními v kvadrantech, je evidentní, že zde docházelo ke značným elastickým deformacím, které spolu s velkým spodním rádiusem pro odvalování vygenerovali takové ztráty, které by žádná zatěžující síla na do protilehlého kvadrantu nepřenesla.

2 Měření 2. konstrukčního návrhu geometrie vahadel

Druhý konstrukční návrh byl vypracován na základě zpětné vazby z měření 1. konstrukčního návrhu a snažil se potlačit jeho slabé stránky. Tuhost byla násobně zvětšena a spodní odvalovací rádius byl o řád zmenšen. Dále byly na vahadlech provedeny „výfrezy“ a výstupky, které sloužili jako dorazy vahadel v krajních (limitních) pozicích a také pro bezproblémové proudění oleje, se kterým prvotní návrh dostatečně nepočítal.



Obr. P- 18: „Rádus na rádus“+ „plocha na plochu“

Kontakt mezi vahadly zde byl koncipován jako „*rádus na rádus*“ + „*plocha na plochu*“ s malým spodním rádiusem pro odvalování – viz obr. P-4. Toto sestavení si kladlo za cíl snížit citlivost vahadlového systému na výrobní toleranci spolu s vyšší funkčností celého systému.

V důsledku těchto úprav se značně zlepšila kinematika mechanismu a výsledek je vidět v tabulce č. P-2.

Tab. P- 10: Tabulka s hodnotami měření 2. konstrukčního návrhu geometrie vahadel

Zatěžovaný kvadrant	Vychýlení v kvadrantu A [mm]	Vychýlení v kvadrantu B [mm]	Vychýlení v kvadrantu C [mm]	Vychýlení v kvadrantu D [mm]	Úhel vychýlení [°]
Kvadrant A	0,25	Nesledováno	0,3	Nesledováno	0,061
Kvadrant B	Nesledováno	0,2	Nesledováno	0,25	0,050
Kvadrant C	0,3	Nesledováno	0,25	Nesledováno	0,061
Kvadrant D	Nesledováno	0,25	Nesledováno	0,3	0,061
Průměr					0,058

Diskuze nad výsledky

Z naměřených hodnot je patrné, že vahadlový systém již fungoval celkem správně. Hodnoty vychýlení $0,2 \div 0,3$ znamenají úhel vychýlení $0,05^\circ \div 0,061^\circ$, což už je úhel blízký požadovanému zadání $0,1^\circ$.

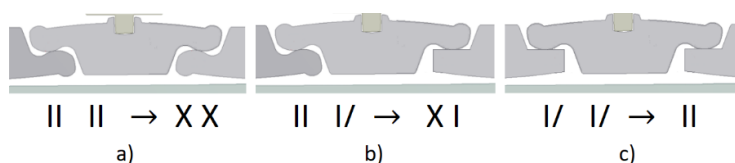
Rozdíly mezi vychýlenými kvadranty jsou v tomto případě zanedbatelné, a proto lze tvrdit, že zde již nedocházelo k takovým elastickým deformacím a ztráty generované tímto mechanismem ve formě právě elastické deformace a tření již byli možné překonat zatěžující silou vyvozenou pomocí šroubového spoje.

3 Měření 3. (finálního) konstrukčního návrhu vahadel

Vzhledem k tomu, že tuhost již byla shledána, jako dostačující, tak byl 3. (finální) konstrukční návrh zaměřen na mikrogeometrii vahadel s cílem ještě zlepšit celkovou kinematiku vahadel. Dále byly upraveny „výfrezy“ na vahadlech s cílem eliminovat technologicky ne moc vhodné výstupky, které sloužili jako dorazy vahadel v krajních (limitních) pozicích a také pro bezproblémové proudění oleje.

Vzhledem k cíli najít optimální geometrii vahadel, byly vyrobeny 3 finální sady (varianty) vahadel pro sestavení:

- „*rádus na rádus*“ + „*rádus na rádus*“,
- „*rádus na rádus*“ + „*rádus na plochu*“,
- „*rádus na plochu*“ + „*rádus na plochu*“.



Obr. P- 19: 3. konstrukční návrh – varianty vahadel [58]

V důsledku těchto úprav se ještě zlepšila kinematika mechanismu a výsledek je vidět v tabulkách č. P-3, P-4 a P-5.

Tab. P- 11: Tabulka s hodnotami měření 3. konstrukčního návrhu geometrie vahadel sestavení „rádius na rádius“+ „rádius na rádius“

Zatěžovaný kvadrant	Vychýlení v kvadrantu A [mm]	Vychýlení v kvadrantu B [mm]	Vychýlení v kvadrantu C [mm]	Vychýlení v kvadrantu D [mm]	Úhel vychýlení [°]
Kvadrant A	0,8	Nesledováno	0,5	Nesledováno	0,144
Kvadrant B	Nesledováno	0,75	Nesledováno	0,6	0,150
Kvadrant C	0,7	Nesledováno	0,5	Nesledováno	0,133
Kvadrant D	Nesledováno	0,6	Nesledováno	0,65	0,139
Průměr					0,142

Tab. P- 12: Tabulka s hodnotami měření 3. konstrukčního návrhu geometrie vahadel sestavení „rádius na rádius“ + „rádius na plochu“

Zatěžovaný kvadrant	Vychýlení v kvadrantu A [mm]	Vychýlení v kvadrantu B [mm]	Vychýlení v kvadrantu C [mm]	Vychýlení v kvadrantu D [mm]	Úhel vychýlení [°]
Kvadrant A	0,5	Nesledováno	0,5	Nesledováno	0,111
Kvadrant B	Nesledováno	0,4	Nesledováno	0,5	0,100
Kvadrant C	0,6	Nesledováno	0,45	Nesledováno	0,117
Kvadrant D	Nesledováno	0,45	Nesledováno	0,5	0,105
Průměr					0,108

Tab. P- 13: Tabulka s hodnotami měření 3. konstrukčního návrhu geometrie vahadel sestavení „rádius na plochu“+ „rádius na plochu“

Zatěžovaný kvadrant	Vychýlení v kvadrantu A [mm]	Vychýlení v kvadrantu B [mm]	Vychýlení v kvadrantu C [mm]	Vychýlení v kvadrantu D [mm]	Úhel vychýlení [°]
Kvadrant A	0,3	Nesledováno	0,35	Nesledováno	0,072
Kvadrant B	Nesledováno	0,4	Nesledováno	0,3	0,078
Kvadrant C	0,35	Nesledováno	0,4	Nesledováno	0,083
Kvadrant D	Nesledováno	0,4	Nesledováno	0,35	0,083
Průměr					0,079

Diskuze nad výsledky

Všechny tři varianty se prokázaly být funkčně vyhovující. Hodnoty vychýlení se lišili pouze v řádu procent. Proto byly všechny tři varianty vybrány na měření na experimentální zařízení umožňující změřit silové spektrum pod každým segmentem ložiska. Toto zařízení bude detailně popsáno v následující příloze.

Příloha 7: Test s měřením silového spektra pod každým segmentem ložiska

1 Měření v horizontální poloze [58]

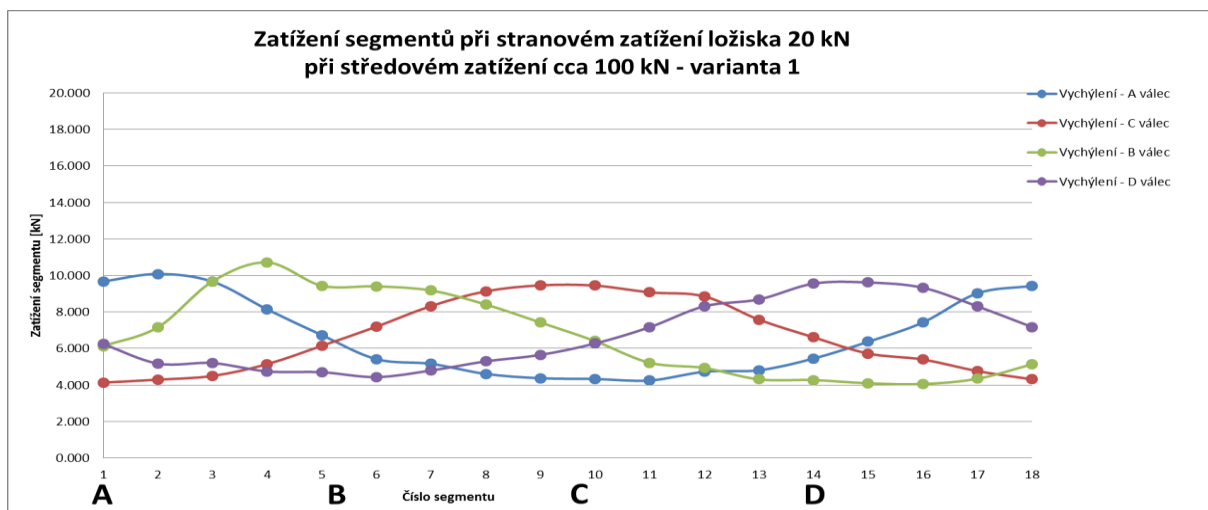
Pro přehlednější zanesení do tabulek a grafů byly sestavy pojmenovány takto:

- 1) Varianta 1 - „rádius na rádius“+ „rádius na rádius“,
- 2) Varianta 2 - „rádius na rádius“ + „rádius na plochu“,
- 3) Varianta 3 - „rádius na plochu“+ „rádius na plochu“.

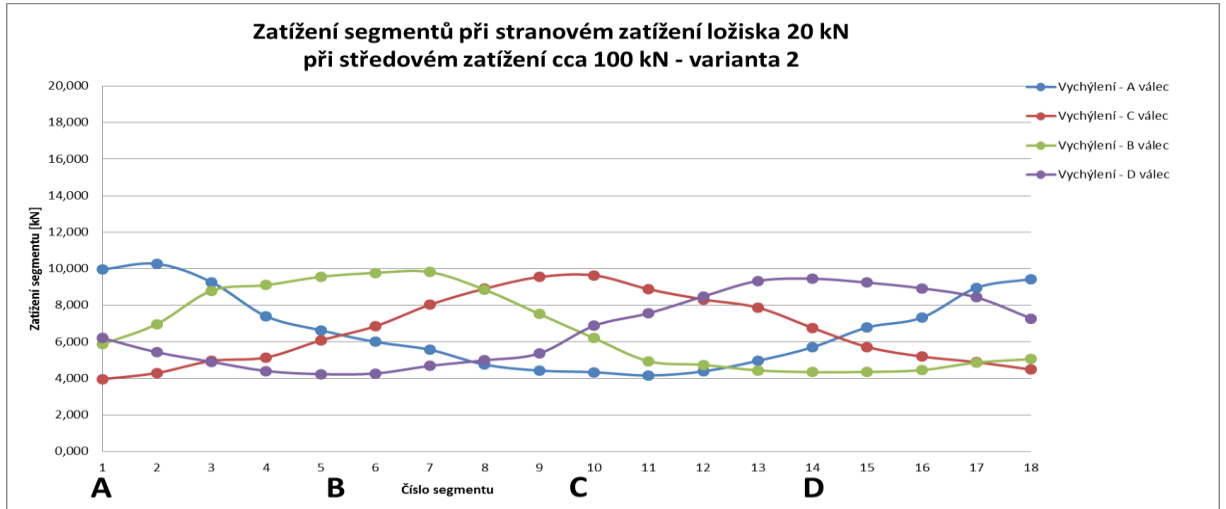
Vzhledem k tomu, že nelze broušenou desku vodorovně ustálit, bylo nejvhodnější změřit vychýlení v každém kvadrantu a hodnoty zprůměrovat. Takto bylo docíleno tzv. průměrné hodnoty vychýlení.

Tab. P- 14: Zatížení postranních válců 20kN [58]

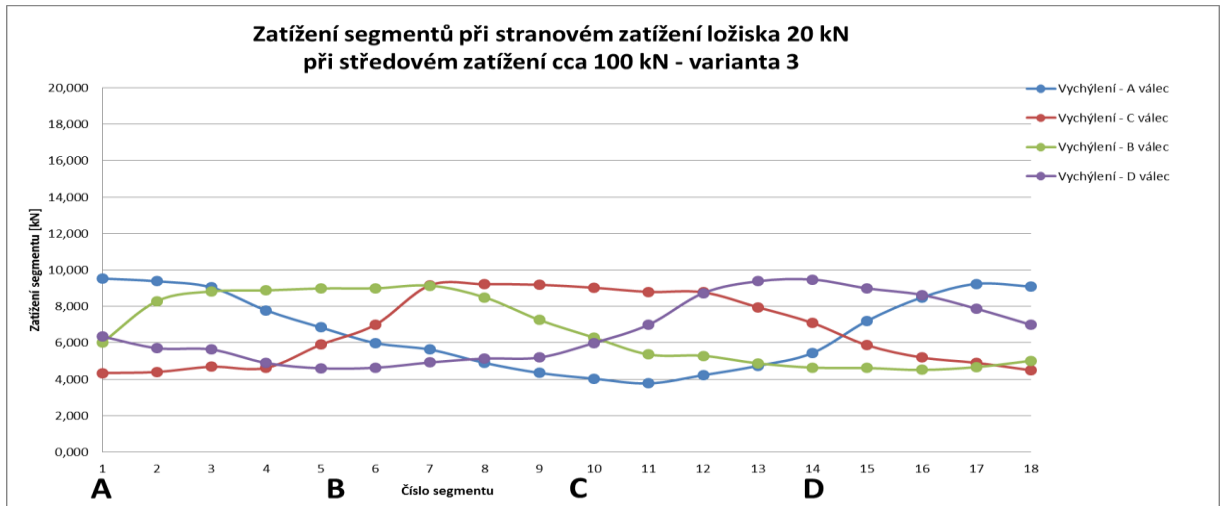
Kvadranty	Varianta 1 [°]	Varianta 2 [°]	Varianta 3 [°]
Kvadrant A	0,064	0,030	0,026
Kvadrant B	0,082	0,045	0,030
Kvadrant C	0,166	0,091	0,045
Kvadrant D	0,129	0,079	0,047
Průměrně:	0,110	0,061	0,037



Obř. P- 20: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]



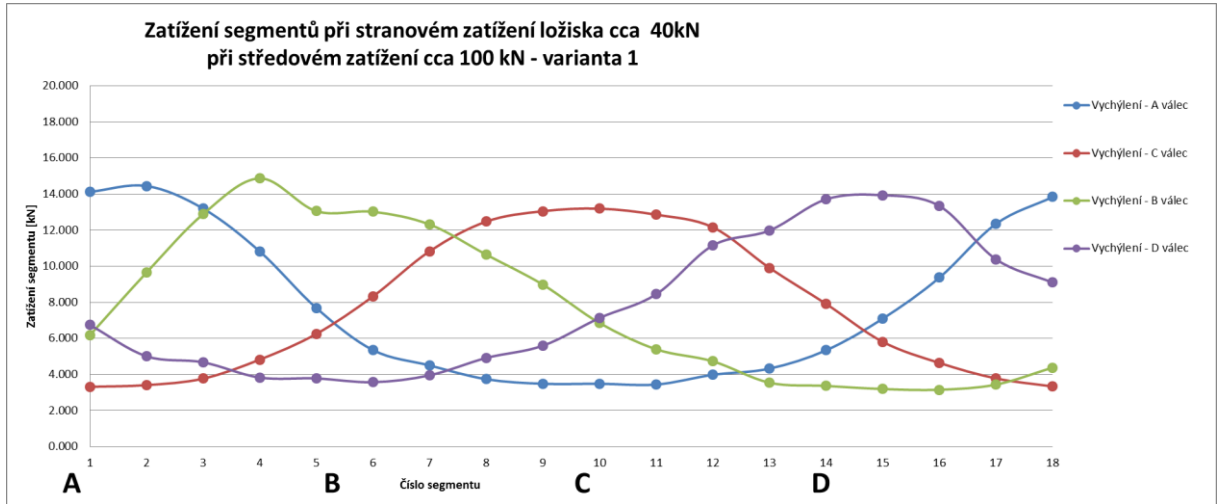
Obr. P- 21: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]



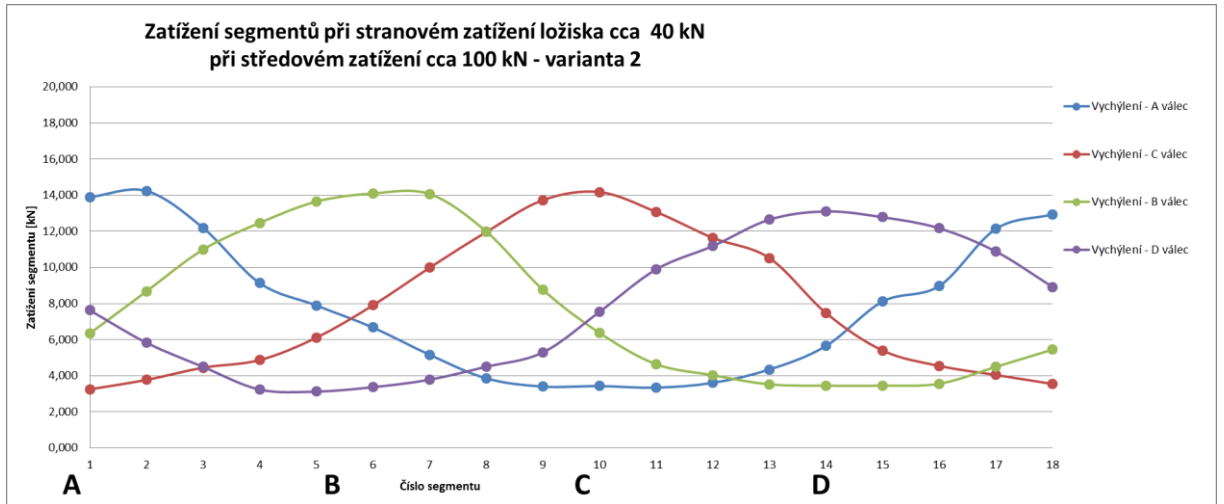
Obr. P- 22: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]

Tab. P- 15: Zatížení postranních válců 40kN [58]

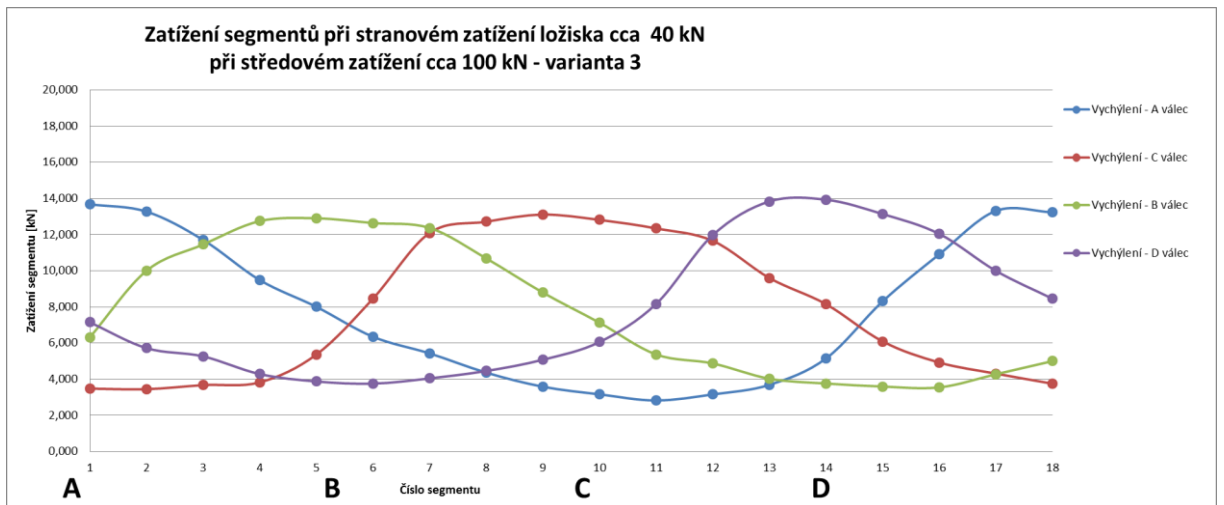
Kvadranty	Varianta 1 [°]	Varianta 2 [°]	Varianta 3 [°]
Kvadrant A	0,110	0,059	0,061
Kvadrant B	0,126	0,078	0,071
Kvadrant C	0,200	0,146	0,084
Kvadrant D	0,187	0,125	0,088
Průměrně:	0,156	0,102	0,076



Obr. P- 23: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]



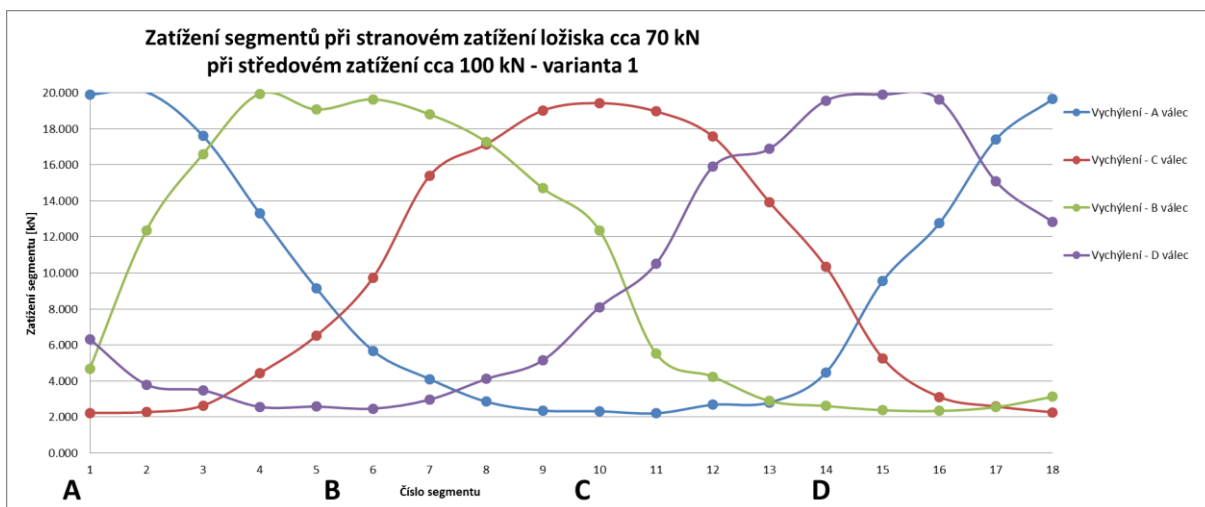
Obr. P- 24: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]



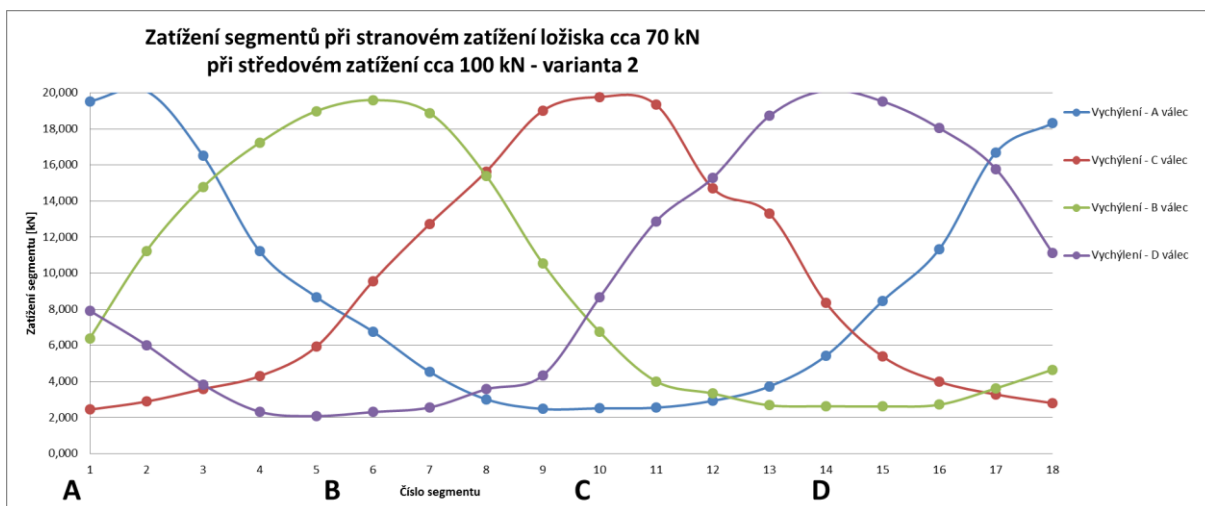
Obr. P- 25: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze [58]

Tab. P- 16: Zatížení postranních válců 70kN [58]

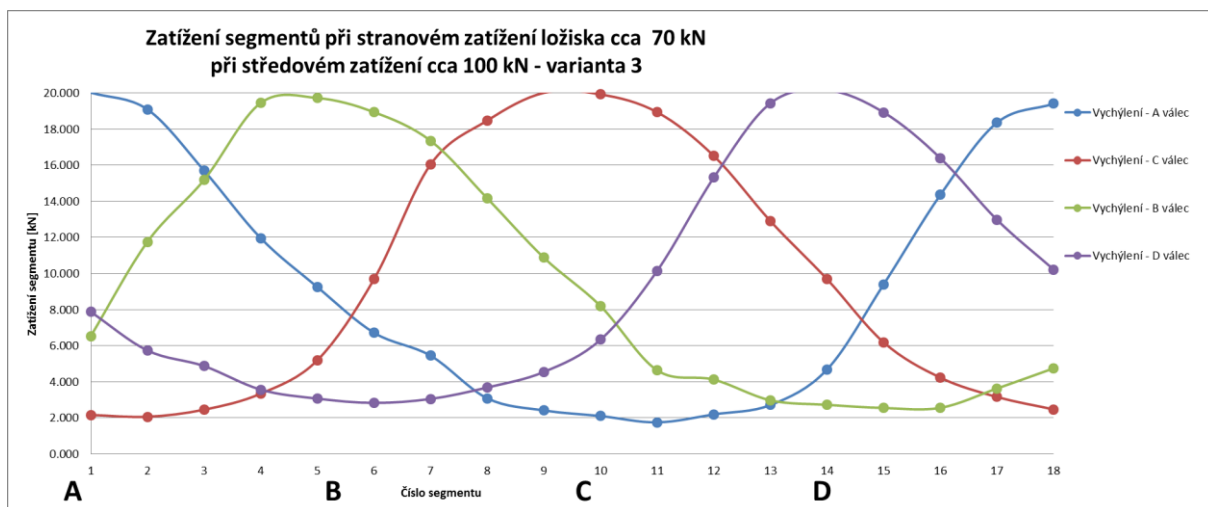
Kvadranty	Varianta 1 [°]	Varianta 2 [°]	Varianta 3 [°]
Kvadrant A	0,157	0,099	0,105
Kvadrant B	0,148	0,116	0,121
Kvadrant C	0,268	0,196	0,146
Kvadrant D	0,235	0,194	0,093
Průměrně:	0,202	0,151	0,116



Obr. P- 26: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]



Obr. P- 27: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]



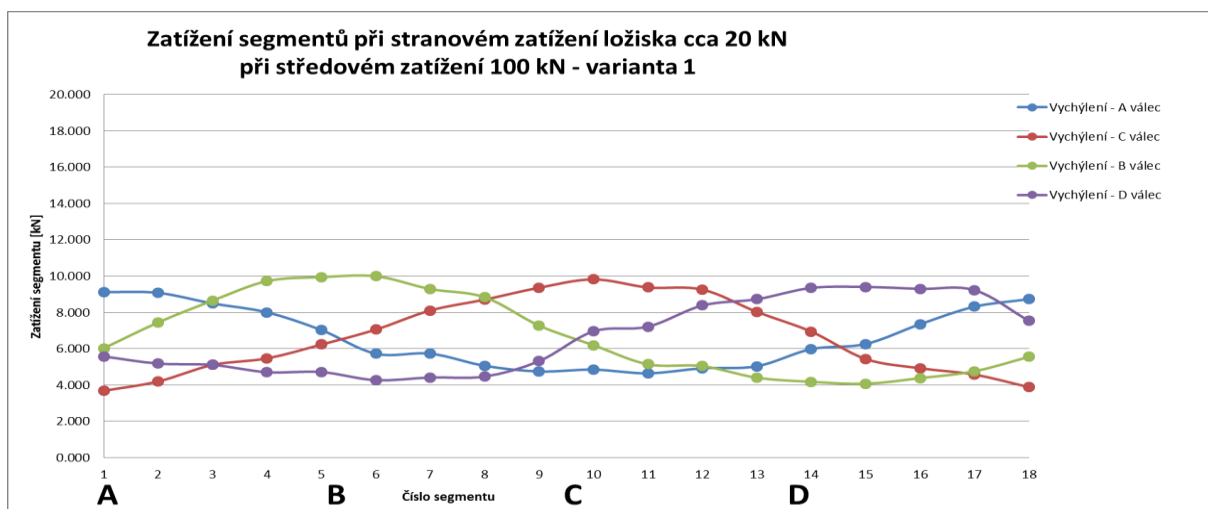
Obr. P- 28: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty v horizontální poloze ložiska [58]

2 Měření ve vertikální poloze [58]

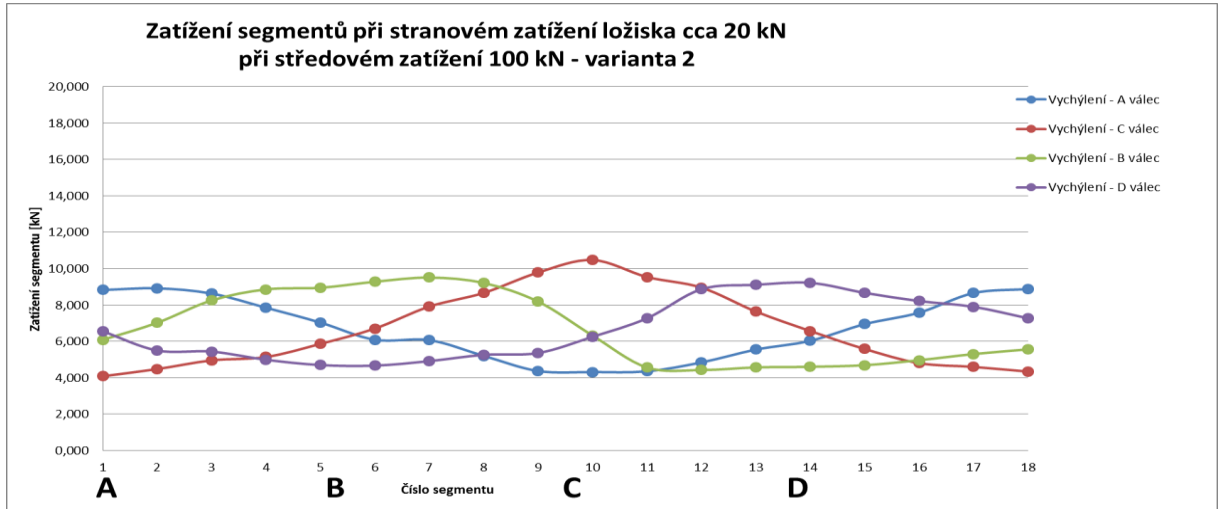
Po změření vše třech variant sestav vahadel v horizontální poloze následovalo měření ve vertikální poloze, které by mělo odhalit případnou omezenou funkčnost v důsledku efektu „sesypání vahadel“ vlivem gravitační síly.

Tab. P- 17: Zatížení postranních válců 20kN [58]

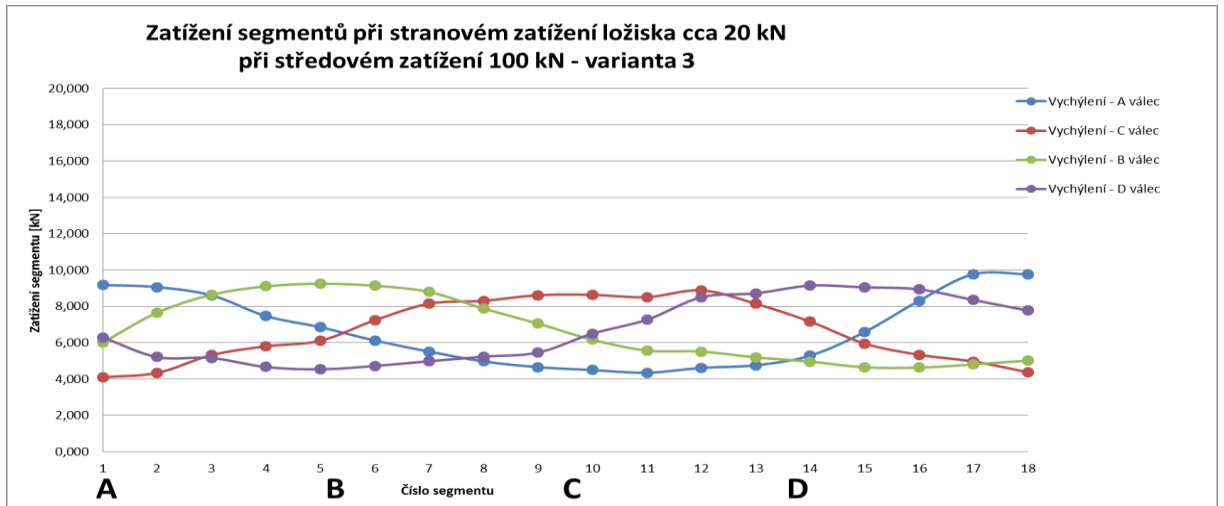
Kvadranty	Varianta 1 [°]	Varianta 2 [°]	Varianta 3 [°]
Kvadrant A	0.049	0.039	0.027
Kvadrant B	-0.126	-0.029	-0.024
Kvadrant C	-0.139	-0.081	-0.053
Kvadrant D	0.054	0.069	0.059
Průměrně:	0.092	0.055	0.041



Obr. P- 29: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]



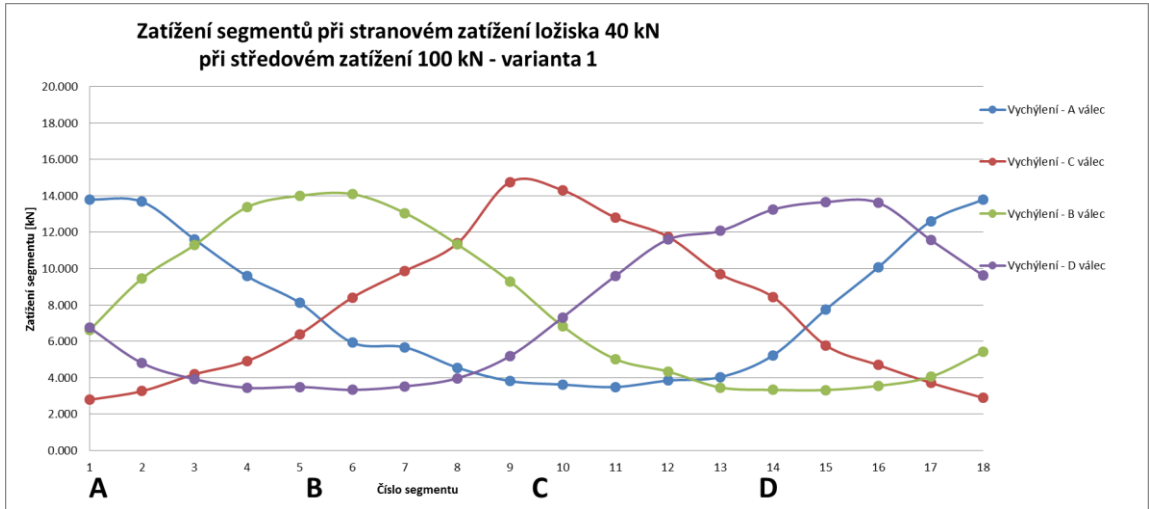
Obr. P- 30: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]



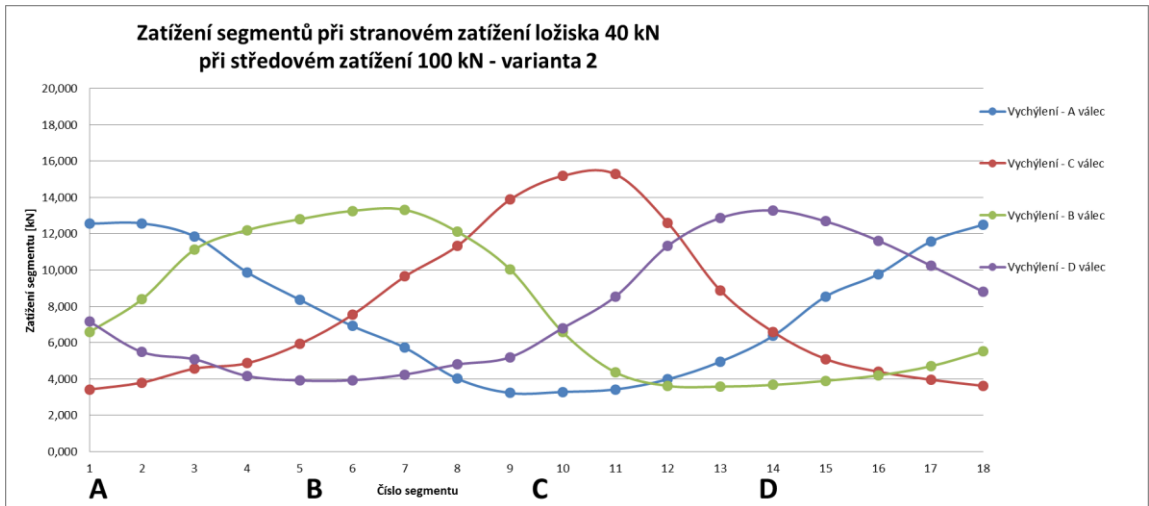
Obr. P- 31: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]

Tab. P- 18: Zatížení postranních válců 40kN [58]

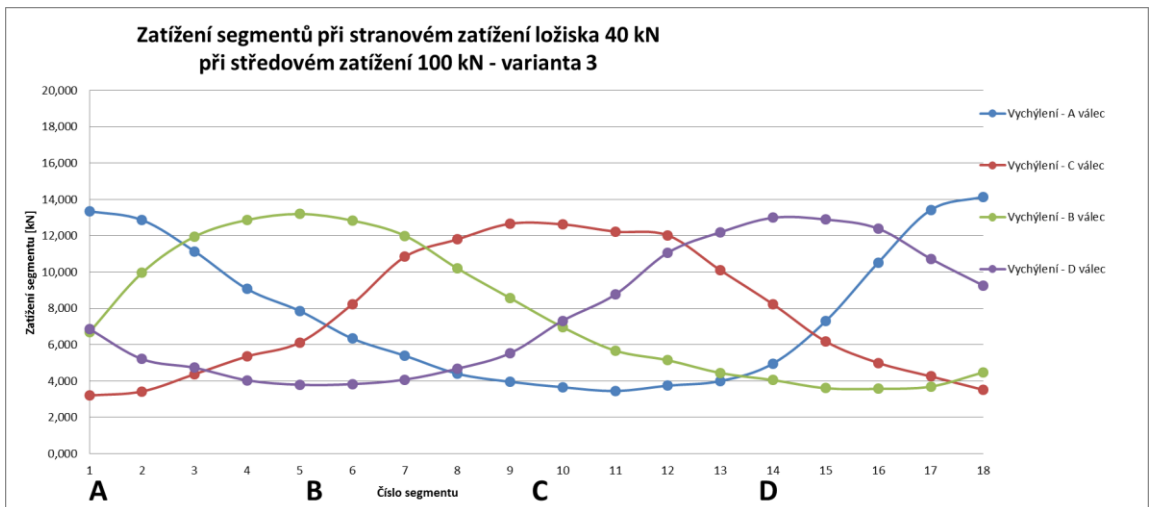
Kvadranty	Varianta 1 [°]	Varianta 2 [°]	Varianta 3 [°]
Kvadrant A	0.082	0.079	0.062
Kvadrant B	-0.176	-0.060	-0.056
Kvadrant C	-0.186	-0.123	-0.096
Kvadrant D	0.094	0.123	0.102
Průměrně:	0.134	0.096	0.079



Obr. P- 32: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]



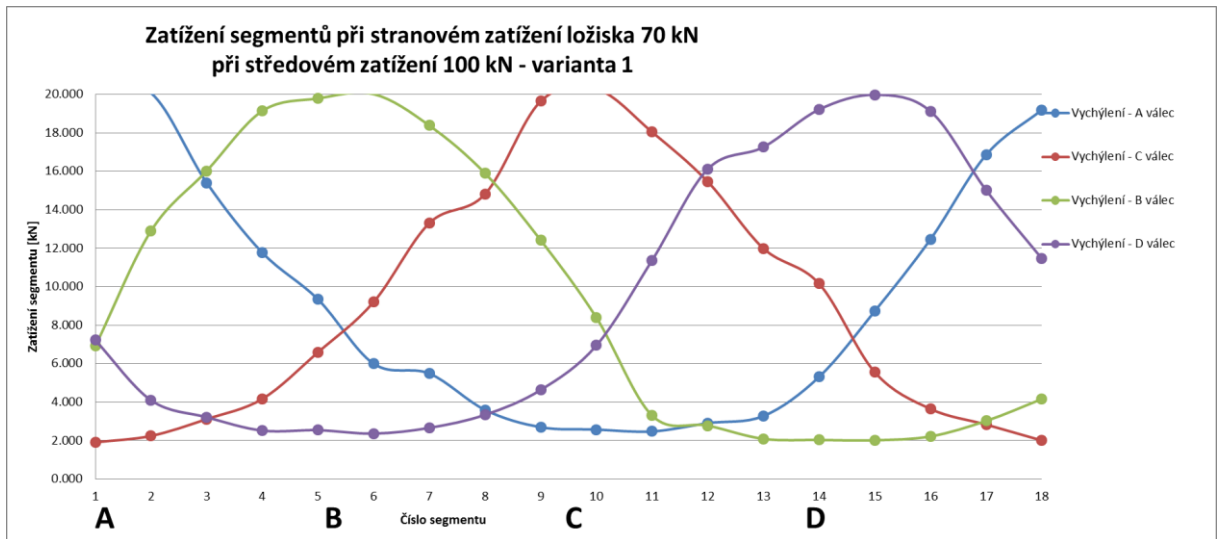
Obr. P- 33: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]



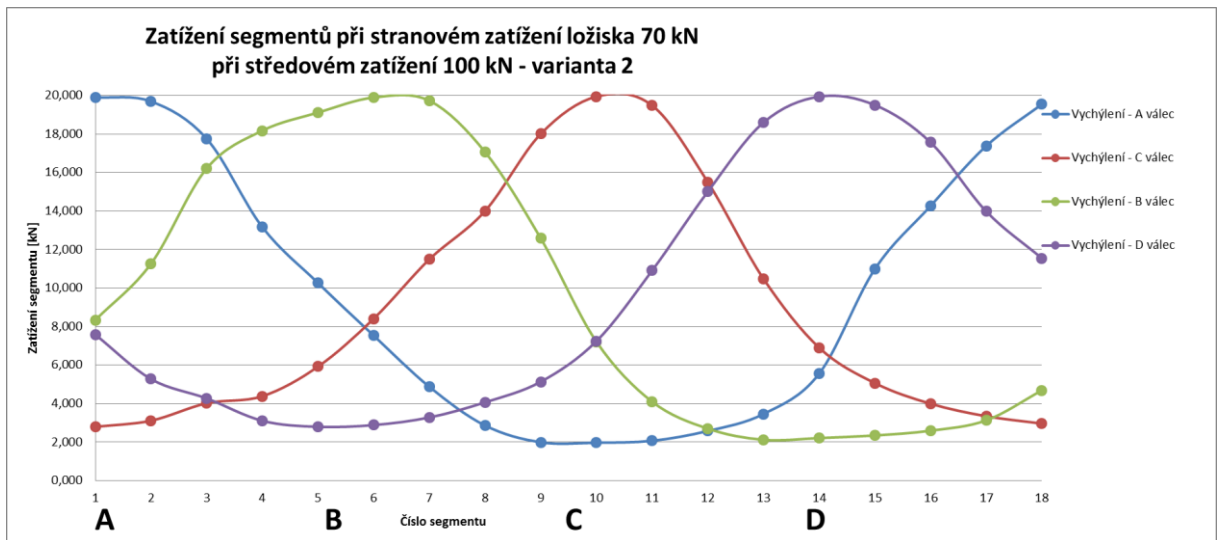
Obr. P- 34: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]

Tab. P- 19: Zatížení postranních válců 70kN [82]

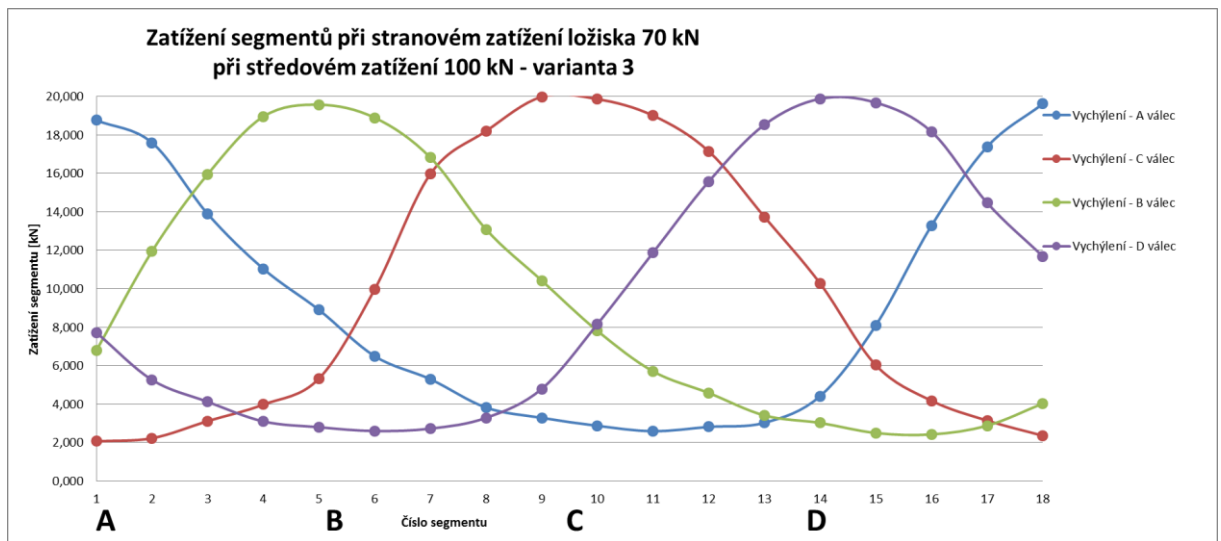
Kvadranty	Varianta 1 [°]	Varianta 2 [°]	Varianta 3 [°]
Kvadrant A	0.134	0.137	0.102
Kvadrant B	-0.215	-0.104	-0.101
Kvadrant C	-0.226	-0.158	-0.154
Kvadrant D	0.145	0.193	0.155
Průměrně:	0.180	0.148	0.128



Obr. P- 35: 1. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska



Obr. P- 36: 2. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze ložiska [58]



Obr. P- 37: 3. varianta vahadel – rozložení sil pod jednotlivými segmenty ve vertikální poloze [58]

Příloha 8: Drsnoměr MAHR MARSURF M300

Technické parametry:

Měřicí rozsah:	do 350 μm	
Citlivost:	0,001 μm	
Normy:	ISO, ASME, JIS a MOTIF (volitelně)	
Vyhodnocované veličiny:	DIN/ISO:	Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rpk, Rk, Rvk, Rv, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rt, R3z, R _{Pc} , R _{mr} , R _{Sm}
	JIS:	Ra, Rz, RzJIS, Sm, S, tp
	ASME:	R _p , R _{pm}
	MOTIF:	R, Ar, Rx, W, CR, CL, Rz, Rmax, R3z, Rt ... 0 - 200 μm
Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 4288 [mm]	1,75; 5,6; 17,5	
Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 12085[mm]	1; 2; 4; 8; 12; 16	
Počet měřitelných drah:	1 - 5 (volitelně)	

K vyhodnocení získaných náměrů byl použit software MarSurf PS1/M300 Explorer



Obr. P- 38: Drsnoměr Marsurf M300

Příloha 9: Mikroskop MULTICHECK PC 500

Technické parametry:

Upínané nástroje	rotační i nerotační nástroje
Typ provedení	horizontální
Rozsah osy x a y	0–150 mm
Možnost natáčení nástroje vůči objektivu	0° – 90°
Zvětšení	10x, 30x, 75x, 90x, 120x a 150x
Přesnost měření	5 μm
Další příslušenství	přípravek pro upínání rotačních nástrojů; přípravek pro měření rotačních i nerotačních nástrojů; prizmatický přípravek pro měření VBD



Obr. P- 39: Dílenský mikroskop MULTICHECK P500

Příloha 10: Lineární frézovací centrum DMU 40 eVo linear

Technické parametry:

Velikost pracovního stolu	Osa X	400 mm
	Osa Y	400 mm
	Osa Z	375 mm
Max. hm. obrobku	250 kg	
Max. otáčky	24 000 min ⁻¹	



Obr. P- 40: DMU 40 eVo linear

Příloha 11: CNC soustruh EMCO MAXXTURN 25

Technické parametry:

Velikost rozjezdů	Osa X	100 mm
	Osa Y	+20/-15 mm
	Osa Z	320 mm
Max průměr tyče	25,4 mm	
Max průměr soustružení	114 mm	
Max. otáčky	8 000 min ⁻¹	



Obr. P- 41: EMCO MAXXTURN 25

Příloha 12: Optický mikroskop IFM G4 ALICONA

Technické parametry:

Velikost rozjezdů	Osa X	100 mm
	Osa Y	100 mm
	Osa Z	100 mm
Minimálně měřitelná drsnost (Ra)	0,03 μm	
Minimálně měřitelná drsnost (Sa)	0,015 μm	
Vertikální rozlišení	2300 - 10nm	



Obr. P- 42: IFM G4 ALICONA

Příloha 13: Zařízení pro úpravu povrchu OTEC DF 3

Toto zařízení pro úpravu povrchu a řezných hran nástrojů včetně leštění drážky ve šroubovici využívá technologii vlečného omílání. Nástroj nebo obrobek je upnut v rotační hlavě, která se postupně noří do média, které vytváří tlak na povrch, a tím dochází k požadované úpravě. Výhodou tohoto zařízení je i možnost vyklonění hlavy díky čemuž je možné leštit zmíněné drážky nástrojů.



Obr. P- 43: OTEC DF 3

Příloha 14: Plán experimentu

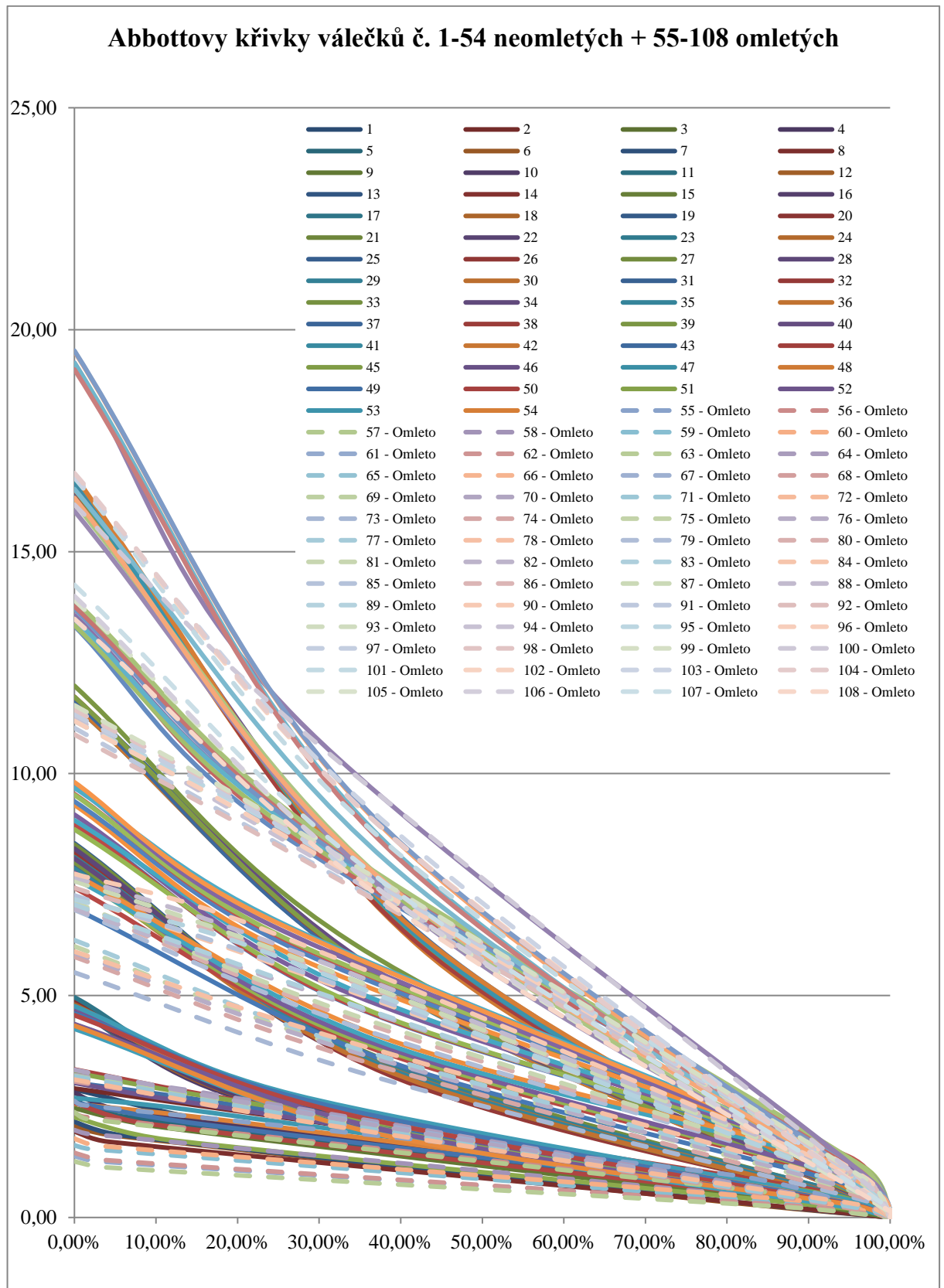
<i>Typ testu</i>	<i>Číslo testu</i>	<i>Číslo válečku</i>	<i>Popis Válečku</i>	<i>Kód válečku</i>	<i>Váleček omletý Ano / Ne</i>	<i>Číslo broušené desky</i>	<i>Tepelné zpracování Válečků / Desek</i>	
Válec / válec	1	1	D12x25 f1	Sf1Z	NE	-	Zušlechťeno	
		2	D12x25 f1			-		
	2	10	D12x25 f2	Sf2Z		-		
		11	D12x25 f2			-		
	3	19	D12x25 f3	Sf3Z		-		
		20	D12x25 f3			-		
	4	21	D12x25 f3			-		
		22	D12x25 f3			-		
	5	37	D12x25 f4	Sf4Z		-		
		38	D12x25 f4			-		
	6	46	D12x25 f5	Sf5Z		-		
		47	D12x25 f5			-		
	7	55	D12x40 f1	SO1Z		ANO		-
		56	D12x40 f1					-
	8	64	D12x40 f2	SO2Z				-
		65	D12x40 f2					-
	9	73	D12x40 f3	SO3Z				-
		74	D12x40 f3					-
	10	75	D12x40 f3					-
76		D12x40 f3	-					
11	91	D12x40 f4	SO4Z	-				
	92	D12x40 f4		-				
12	100	D12x40 f5	SO5Z	-				
	101	D12x40 f5		-				
13	3	D12x25 f1	Sf1ZN	NE	-			
	4	D12x25 f1			-			
14	12	D12x25 f2	Sf2ZN		-			
	13	D12x25 f2			-			
15	23	D12x25 f3	Sf3ZN		-			
	24	D12x25 f3			-			
16	25	D12x25 f3			-			
	26	D12x25 f3			-			
17	39	D12x25 f4	Sf4ZN		-			
	40	D12x25 f4			-			
18	48	D12x25 f5	Sf5ZN		-			
	49	D12x25 f5			-			
19	57	D12x40 f1	SO1ZN		ANO	-	Zušlechťeno + Nitridace	

		58	D12x40 f1			-				
	20	66	D12x40 f2	SOf2ZN		-				
		67	D12x40 f2			-				
		77	D12x40 f3		SOf3ZN		-			
	78	D12x40 f3		-						
	79	D12x40 f3		-						
	22	80	D12x40 f3			-				
		93	D12x40 f4	SOf4ZN		-				
	94	D12x40 f4				-				
	24	102	D12x40 f5	SOf5ZN		-				
		103	D12x40 f5				-			
	25	5	D12x25 f1	Sf1ZBN	NE		Zušlechťeno + Bezproude niklování			
		6	D12x25 f1						-	
	26	14	D12x25 f2	Sf2ZBN				-		
		15	D12x25 f2						-	
	27	27	D12x25 f3	Sf3ZBN				-		
		28	D12x25 f3						-	
	28	29	D12x25 f3						-	
		30	D12x25 f3						-	
	29	41	D12x25 f4	Sf4ZBN				-		
		42	D12x25 f4						-	
	30	50	D12x25 f5	Sf5ZBN				-		
		51	D12x25 f5						-	
	31	59	D12x40 f1	SOf1ZBN		ANO				
		60	D12x40 f1							
	32	68	D12x40 f2	SOf2ZBN						-
		69	D12x40 f2							
	33	81	D12x40 f3	SOf3ZBN						-
		82	D12x40 f3							
	34	83	D12x40 f3					-		
		84	D12x40 f3					-		
	35	95	D12x40 f4	SOf4ZBN			-			
		96	D12x40 f4					-		
	36	104	D12x40 f5	SOf5ZBN			-			
		105	D12x40 f5					-		

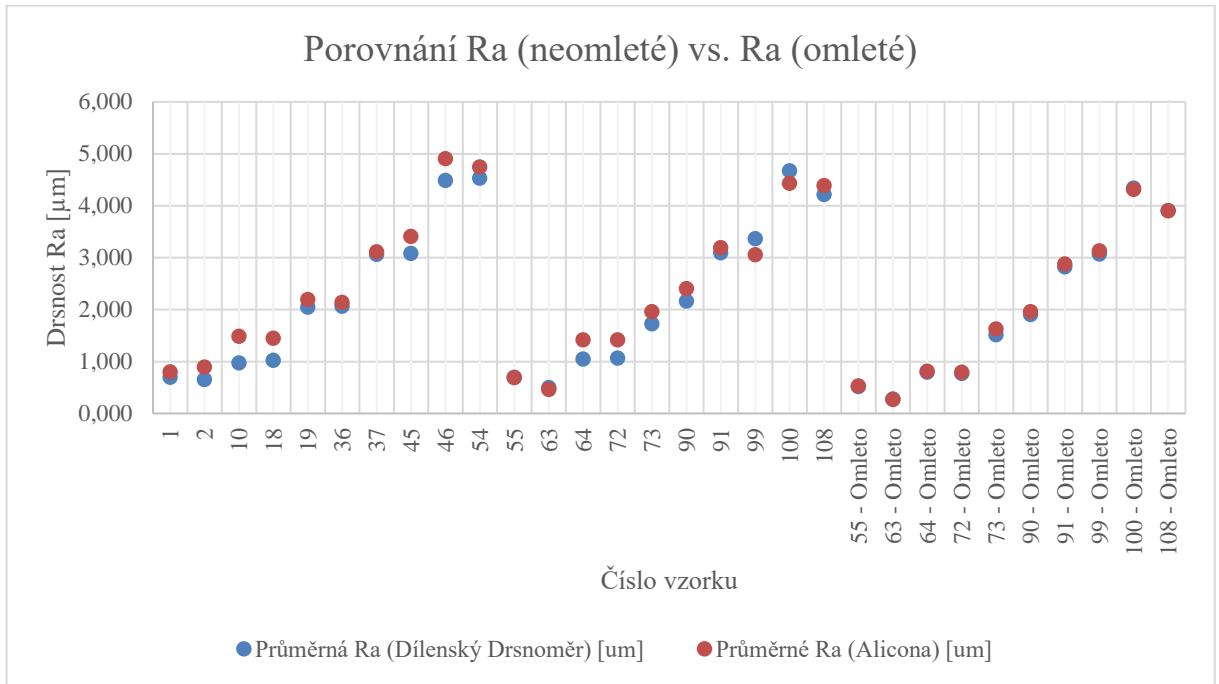
<i>Typ testu</i>	<i>Číslo testu</i>	<i>Číslo válečku</i>	<i>Popis Válečku</i>	<i>Kód válečku</i>	<i>Váleček omletý Ano / Ne</i>	<i>Číslo broušené desky</i>	<i>Tepelné zpracování Válečků / Desek</i>
Válec / Plocha	37	7	D12x25 f1	Sf1Z	NE	1	Zušlechťeno
	38	16	D12x25 f2	Sf2Z		2	
	39	31	D12x25 f3	Sf3Z		3	
	40	32	D12x25 f3			4	
	41	43	D12x25 f4	Sf4Z		5	
	42	52	D12x25 f5	Sf5Z		6	
	43	61	D12x40 f1	SO f1Z	ANO	7	
	44	70	D12x40 f2	SO f2Z		8	
	45	85	D12x40 f3	SO f3Z		9	
	46	86	D12x40 f3			10	
	47	97	D12x40 f4	SO f4Z		11	
	48	106	D12x40 f5	SO f5Z		12	
	49	8	D12x25 f1	Sf1ZN	NE	13	Zušlechťeno + Nitridace
	50	17	D12x25 f2	Sf2ZN		14	
	51	33	D12x25 f3	Sf3ZN		15	
	52	34	D12x25 f3			16	
	53	44	D12x25 f4	Sf4ZN		17	
	54	53	D12x25 f5	Sf5ZN		18	
	55	62	D12x40 f1	SO f1ZN	ANO	19	
	56	71	D12x40 f2	SO f2ZN		20	

	57	87	D12x40 f3	SOf3ZBN		21	Zušlechťeno + Bezproude niklování
	58	88	D12x40 f3			22	
	59	98	D12x40 f4	SOf4ZBN		23	
	60	107	D12x40 f5	SOf5ZBN		24	
	61	9	D12x25 f1	Sf1ZBN	NE	25	
	62	18	D12x25 f2	Sf2ZBN		26	
	63	35	D12x25 f3	Sf3ZBN		27	
	64	36	D12x25 f3			28	
	65	45	D12x25 f4	Sf4ZBN		29	
	66	54	D12x25 f5	Sf5ZBN		30	
	67	63	D12x40 f1	SOf1ZBN	ANO	31	
	68	72	D12x40 f2	SOf2ZBN		32	
	69	89	D12x40 f3	SOf3ZBN		33	
	70	90	D12x40 f3			34	
	71	99	D12x40 f4	SOf4ZBN		35	
	72	108	D12x40 f5	SOf5ZBN		36	

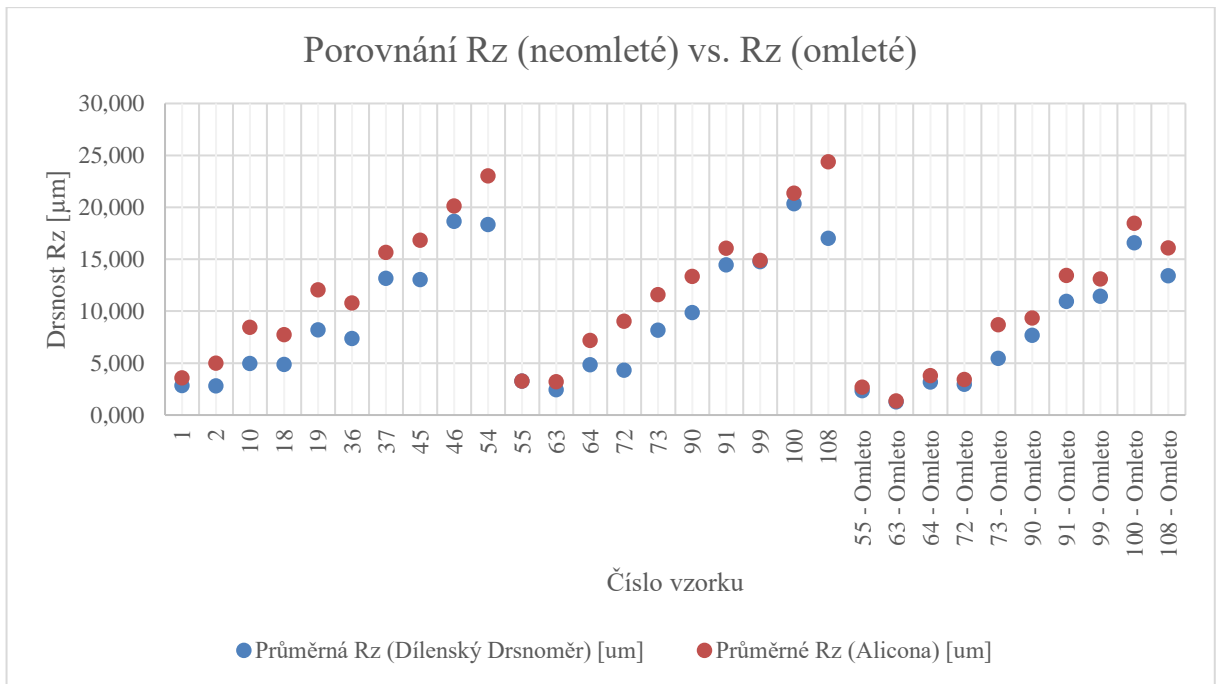
Příloha 15: Vybrané grafy drsností



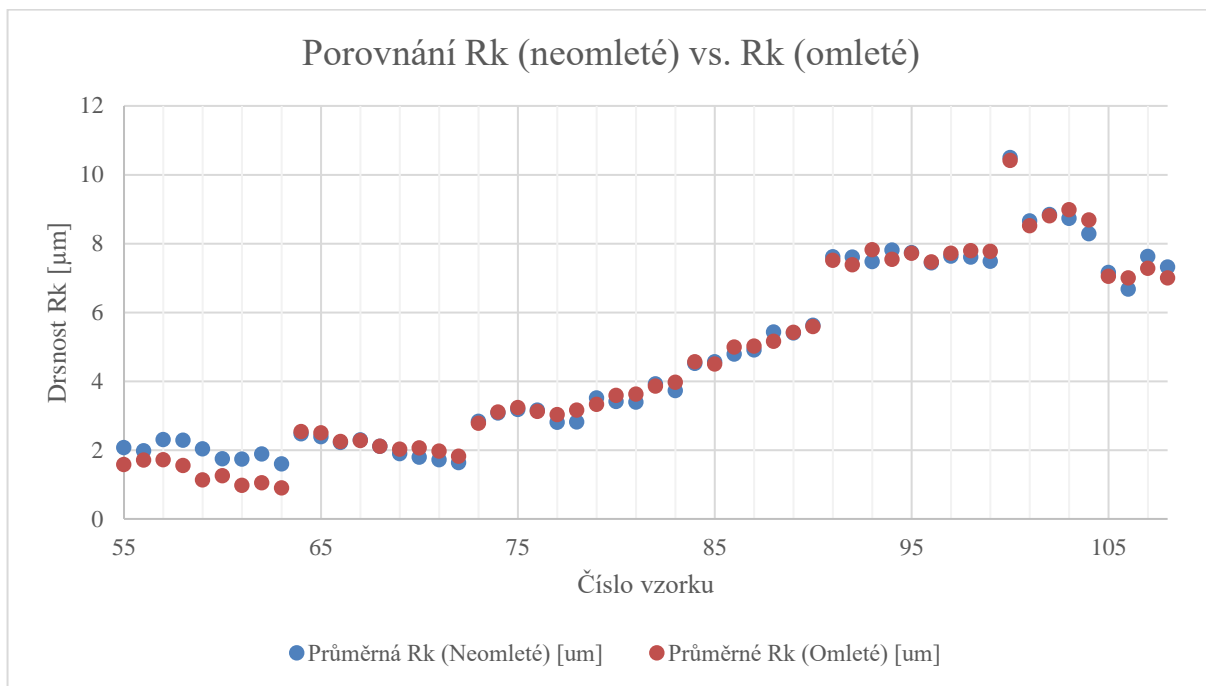
Obr. P- 44: Abbottovy křivky válečků č. 1-54 neomletých + 55-108 omletých



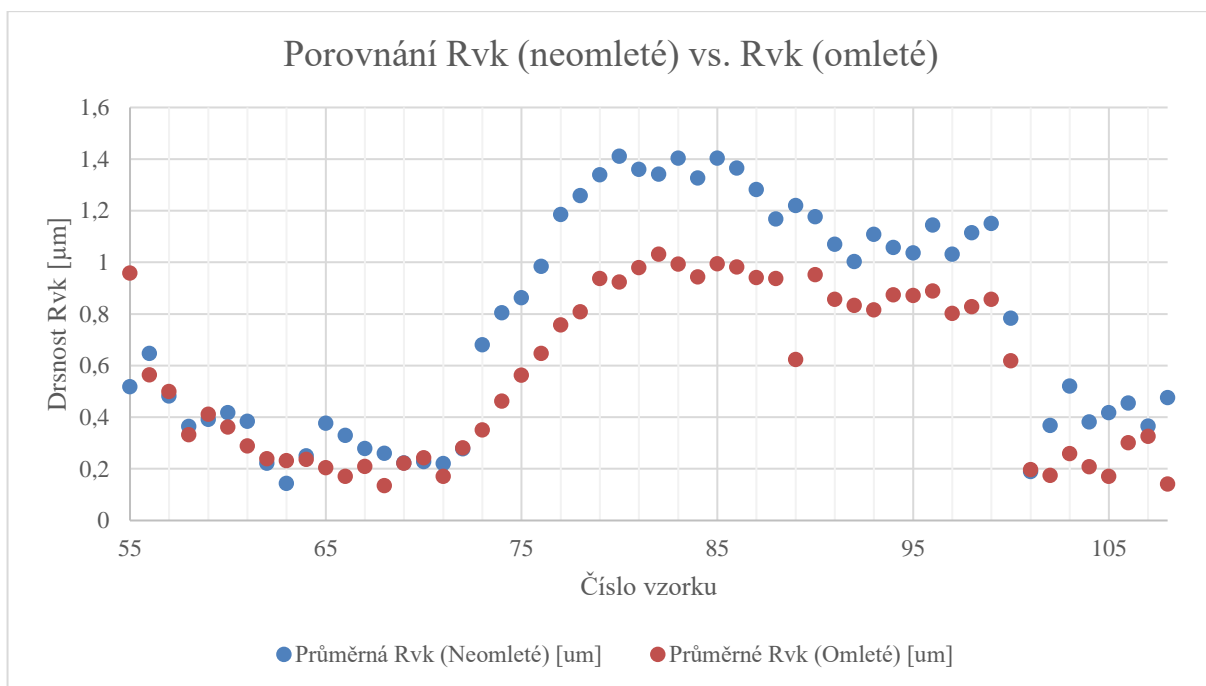
Obr. P- 45: Porovnání naměřených drsností pomocí drsnoměru MAHR a optického mikroskopu IFM G4 ALICONA



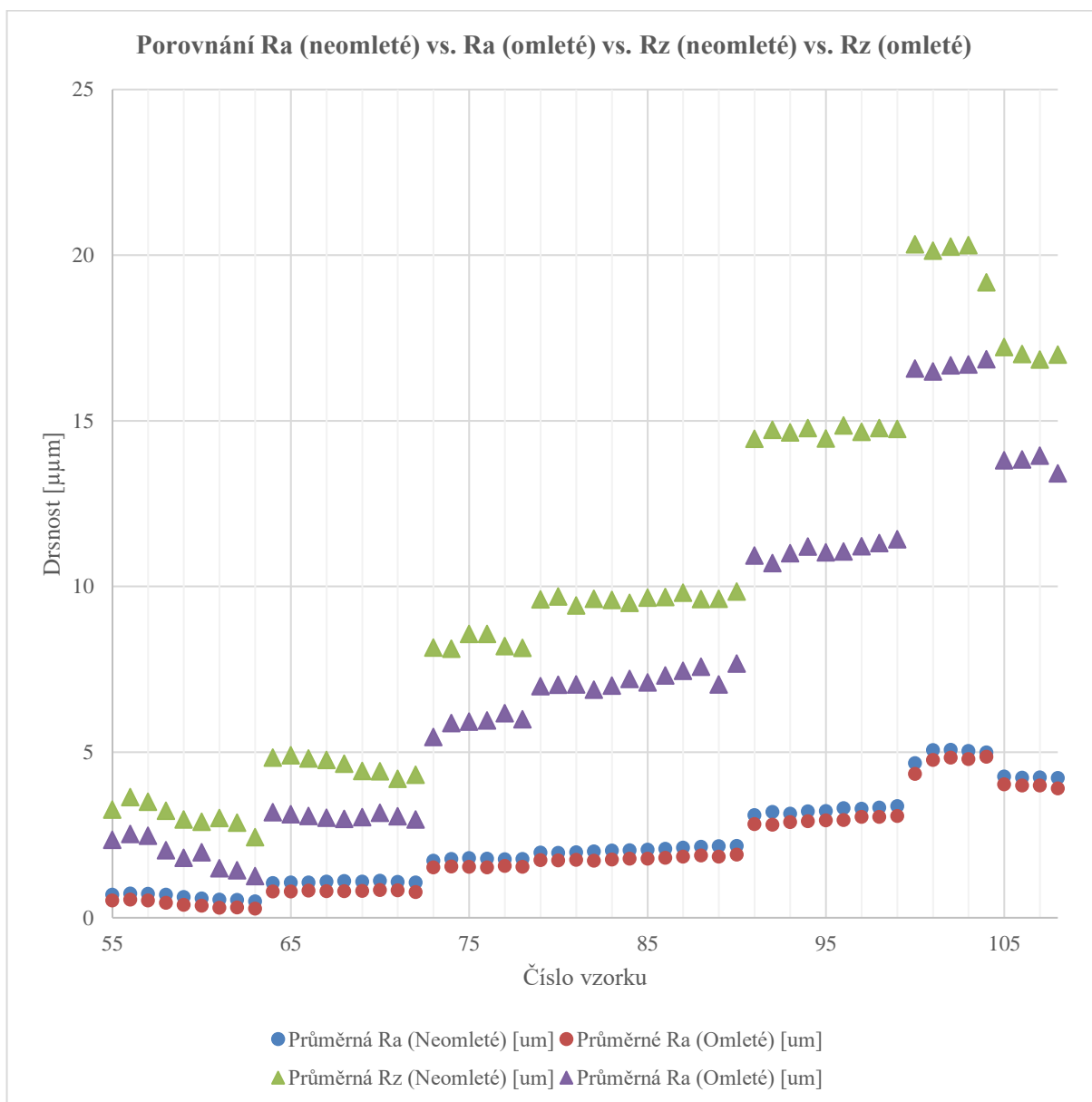
Obr. P- 46: Porovnání naměřených drsností pomocí drsnoměru MAHR a optického mikroskopu IFM G4 ALICONA



Obr. P- 47: Porovnání drsností Rk před a po omletí



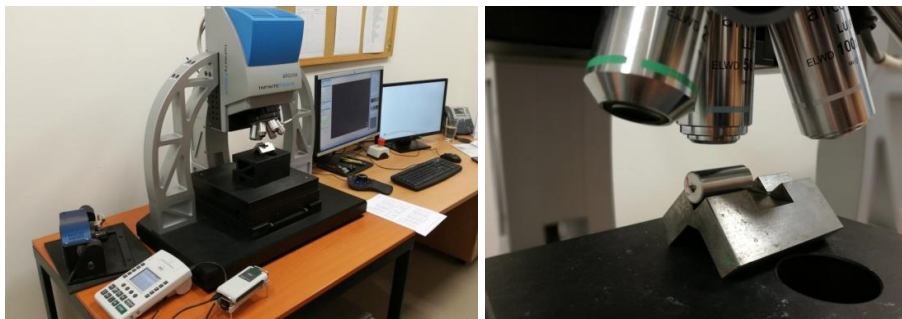
Obr. P- 48: Porovnání drsností Rvk před a po omletí



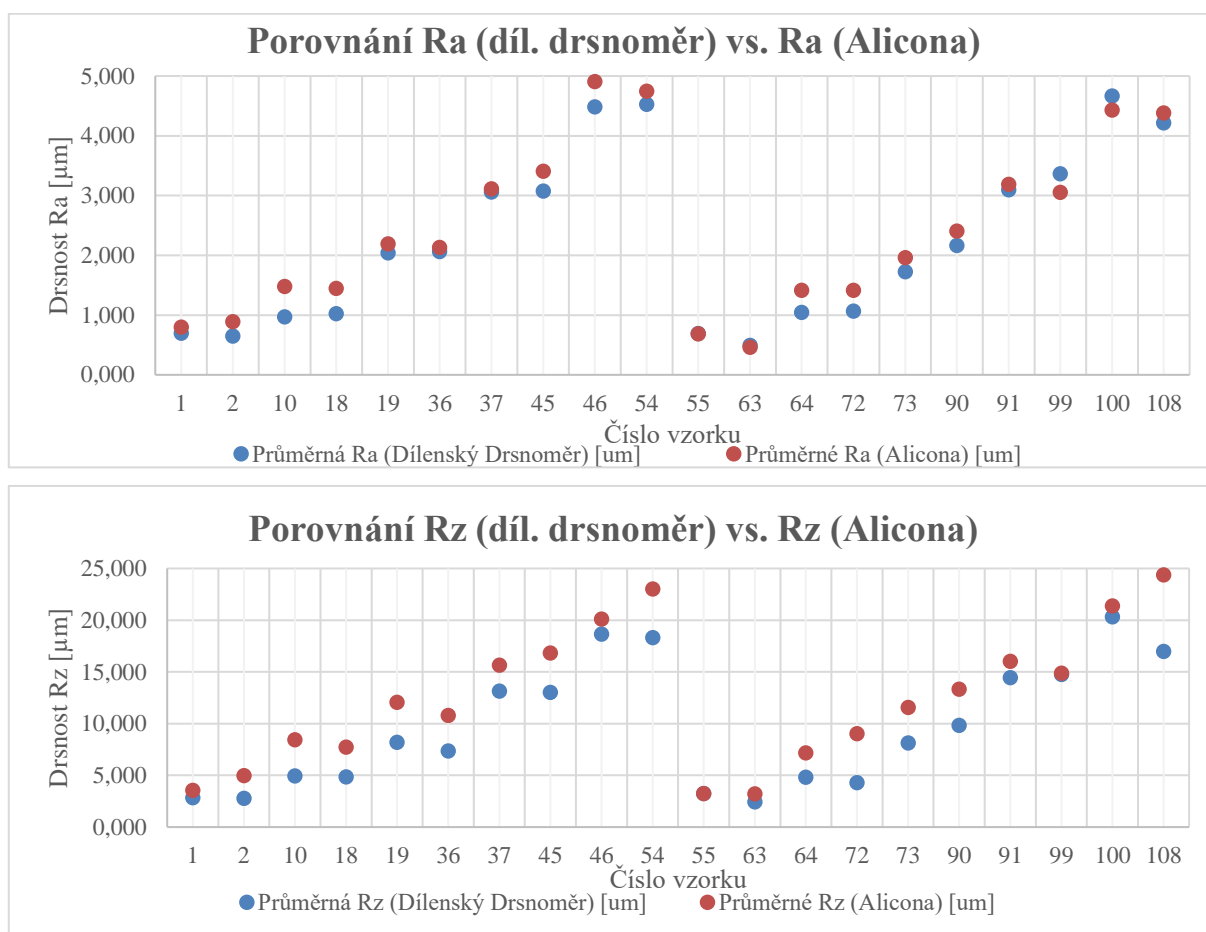
Obr. P- 49: Porovnání Ra (neomleté) vs. Ra (omleté) vs. Rz (neomleté) vs. Rz (omleté)

Porovnání Optického 3D měření povrchu vs měření povrchu pomocí dílenského drsnoměru Mahr MarSurf M300

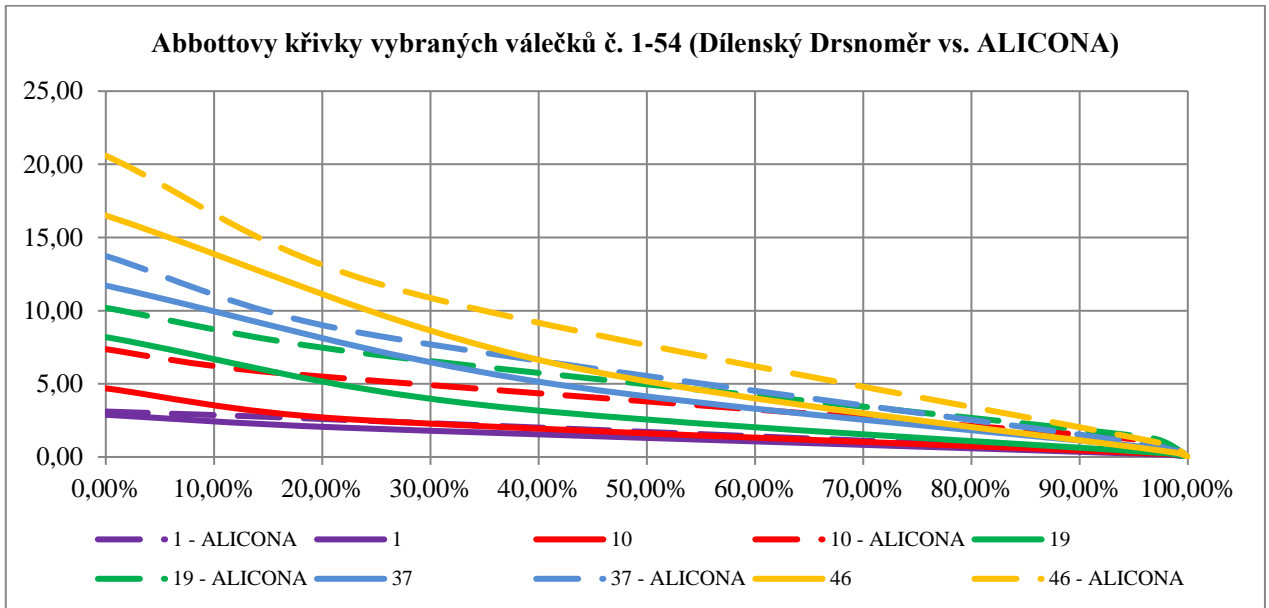
Optické 3D měření povrchu pomocí přístroje Alicona (viz. Příloha 12) sloužilo jako kontrola a porovnání ke konvenčnímu měření pomocí dílenského drsnoměru Mahr MarSurf M300.



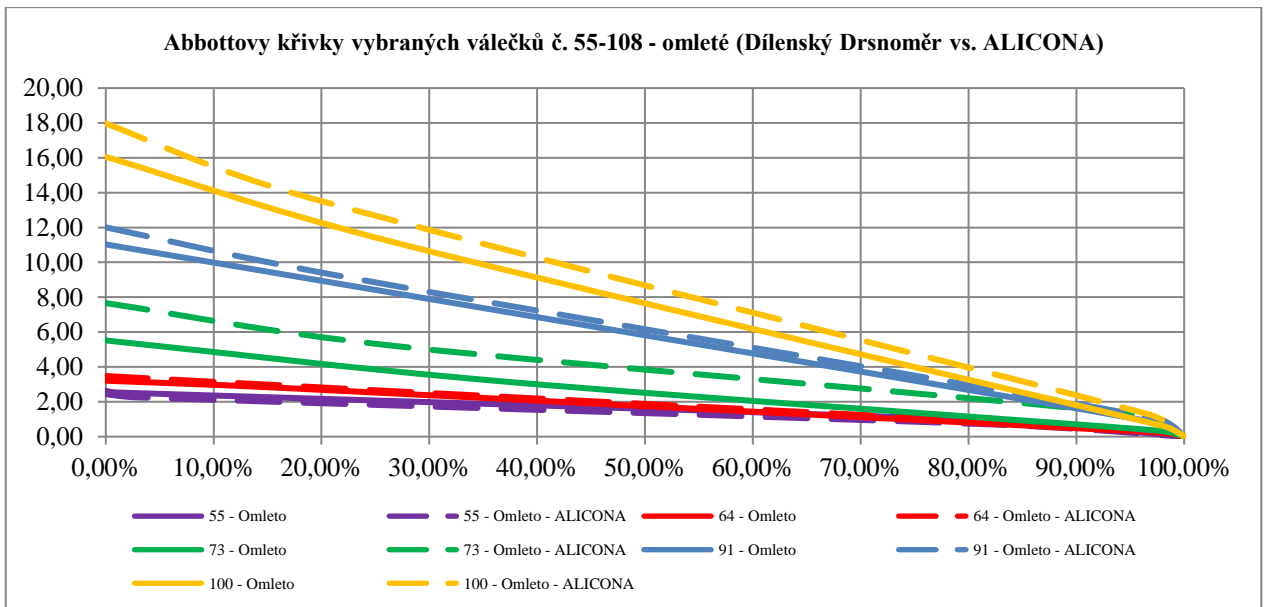
Obr. P- 50: Optické 3D měření povrchu pomocí přístroje Alicona



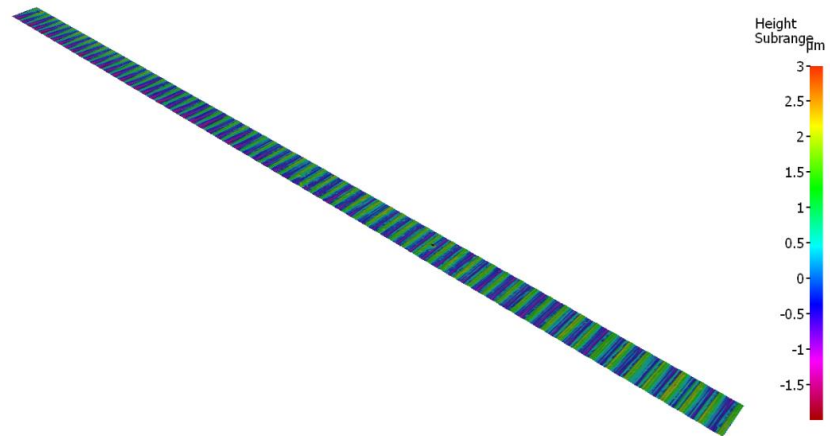
Obr. P- 51: Porovnání drsností změřených díl. drsnoměrem a Aliconou [autor]



Obr. P- 52: Abbottovy křivky vybraných válečků č. 1-54 (Dílenský Drsnoměr vs. ALICONA)



Obr. P- 53: Abbottovy křivky vybraných válečků č. 55-108 - omléte (Dílenský Drsnoměr vs. ALICONA)



Obr. P- 54: Scan válečku č. 55 před omíláním [autor]

Příloha 16: Změřené plochy stop vytvořených na tribometru vzájemným třením válečků

Tab. P- 20: Změřené plochy stop vytvořených na tribometru vzájemným třením válečků

Vzorky		Plocha opotřebení [mm ²]			
		1,8 tis 5 N	5 tis 5 N	10 tis 5 N	20 tis 5 N
Vzorek TZ (neomletý)	Vzorek 1-2 (f1)	6,51	12,82	23,72	30,54
	Vzorek 10-11 (f2)	4,67	11,30	20,46	30,53
	Vzorek 19-20 (f3)	4,95	9,37	18,84	29,76
	Vzorek 21-22 (f3)	5,85	14,32	19,56	21,70
	Vzorek 37-38 (f4)	5,01	10,16	14,78	20,45
	Vzorek 46-47 (f5)	6,94	9,53	10,89	19,16
Vzorek TZ (omletý)	Vzorek 55-56 (f1)	3,55	14,01	14,80	24,28
	Vzorek 64-65 (f2)	5,03	13,55	19,60	24,86
	Vzorek 73-74 (f3)	5,57	13,01	17,53	22,12
	Vzorek 75-76 (f3)	6,14	12,45	18,28	21,40
	Vzorek 91-92 (f4)	4,93	12,11	18,17	20,94
	Vzorek 100-101 (f5)	4,97	9,85	16,48	20,12
Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	Vzorek 3-4 (f1)	6,94	9,57	13,27	17,64
	Vzorek 12-13 (f2)	6,54	7,07	11,83	15,70
	Vzorek 23-24 (f3)	5,61	8,87	12,50	14,73
	Vzorek 25-26 (f3)	2,99	5,62	9,01	15,40
	Vzorek 39-40 (f4)	2,54	3,67	11,92	19,28
	Vzorek 48-49 (f5)	2,90	8,49	9,01	12,25
Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	Vzorek 57-58 (f1)	2,32	3,76	9,12	11,91
	Vzorek 66-67 (f2)	3,85	7,17	9,47	11,73
	Vzorek 77-78 (f3)	3,48	8,17	11,19	15,59
	Vzorek 79-80 (f3)	2,22	9,34	15,17	19,62
	Vzorek 93-94 (f4)	2,05	7,97	10,63	13,51
	Vzorek 102-103 (f5)	2,14	4,84	8,55	15,96
Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	Vzorek 5-6 (f1)	2,06	2,87	2,86	5,81
	Vzorek 14-15 (f2)	2,01	2,10	3,36	4,87
	Vzorek 27-28 (f3)	1,69	2,16	3,52	5,07
	Vzorek 29-30 (f3)	1,40	1,82	2,58	3,82
	Vzorek 41-42 (f4)	1,44	2,05	3,21	5,35
	Vzorek 50-51 (f5)	1,49	1,91	2,80	3,47
Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	Vzorek 59-60 (f1)	2,25	3,75	4,04	5,11
	Vzorek 68-69 (f2)	2,13	3,11	3,46	5,95
	Vzorek 81-82 (f3)	1,64	2,14	2,75	3,78
	Vzorek 83-84 (f3)	1,63	2,87	2,30	3,74
	Vzorek 95-96 (f4)	1,99	2,14	2,31	3,55
	Vzorek 104-105 (f5)	1,87	2,39	2,79	4,27

Příloha 17: Scheffeho testy vybraných parametrů

Tab. P- 21: Scheffeho test – Posuv

Buňka č.	Scheffe test; Proměnná – Opotřebenění (Ra) Chyba: Mezi MS = 3,3540, df = 24,000					
	Posuv	f1	f2	f3	f4	f5
1	f1		0,999491	0,880275	0,176884	0,013312
2	f2	0,999491		0,957791	0,259108	0,022549
3	f3	0,880275	0,957791		0,449976	0,035167
4	f4	0,176884	0,259108	0,449976		0,768846
5	f5	0,013312	0,022549	0,035167	0,768846	

Tab. P- 22: Scheffeho test – Počet cyklů

Buňka č.	Scheffe test; Proměnná Opotřebenění (Ra) Chyba: Mezi MS = 3,3540, df = 24,000				
	Počet cyklů	1800 cykl.	5000 cykl.	10 000 cykl.	20 000 cykl.
1	1800 cykl.		0,000000	0,000000	0,000000
2	5000 cykl.	0,000000		0,000001	0,000000
3	10 000 cykl.	0,000000	0,000001		0,000000
4	20 000 cykl.	0,000000	0,000000	0,000000	

Tab. P- 23: Scheffeho test – Stav povrchu vs. Posuv

Buňka č.	Posuv	Stav povrchu	Scheffe test; Proměnná Opořebení (Ra) Chyba: Mezi MS = 3,3540, df = 24,000																													
			{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}	{13}	{14}	{15}	{16}	{17}	{18}	{19}	{20}	{21}	{22}	{23}	{24}	{25}	{26}	{27}	{28}	{29}	{30}
1	f1	Vzorek TZ (neomletý)		0,994	0,632	0,006	0,000	0,000	1,000	1,000	0,226	0,026	0,000	0,000	1,000	0,990	0,023	0,102	0,000	0,000	0,830	0,992	0,098	0,044	0,000	0,000	0,565	0,881	0,029	0,021	0,000	0,000
2	f1	Vzorek TZ (omletý)	0,994		1,000	0,391	0,017	0,025	1,000	1,000	0,998	0,755	0,012	0,022	1,000	1,000	0,877	0,996	0,001	0,001	1,000	1,000	0,971	0,867	0,011	0,006	1,000	1,000	0,782	0,705	0,006	0,009
3	f1	Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	0,632	1,000		0,948	0,169	0,235	0,966	0,998	1,000	0,999	0,128	0,212	0,994	1,000	1,000	0,022	0,018	1,000	1,000	1,000	1,000	0,119	0,073	1,000	1,000	0,999	0,998	0,067	0,100	
4	f1	Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	0,006	0,391	0,948		1,000	1,000	0,039	0,105	1,000	1,000	0,999	1,000	0,033	0,104	1,000	0,990	0,981	0,971	0,824	0,424	1,000	1,000	0,999	0,993	0,968	0,762	1,000	1,000	0,992	0,998
5	f1	Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	0,000	0,017	0,169	1,000		1,000	0,001	0,003	0,531	0,980	1,000	1,000	0,000	0,002	0,538	0,192	1,000	1,000	0,085	0,019	0,793	0,941	1,000	1,000	0,205	0,066	0,974	0,988	1,000	1,000
6	f1	Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	0,000	0,025	0,235	1,000	1,000		0,001	0,004	0,645	0,994	1,000	1,000	0,001	0,003	0,670	0,276	1,000	1,000	0,123	0,029	0,877	0,975	1,000	1,000	0,281	0,096	0,991	0,997	1,000	1,000
7	f2	Vzorek TZ (neomletý)	1,000	1,000	0,966	0,039	0,001	0,001		1,000	0,657	0,138	0,001	0,001	1,000	1,000	0,157	0,471	0,000	0,000	0,996	1,000	0,390	0,211	0,001	0,000	0,945	0,998	0,152	0,117	0,000	0,000
8	f2	Vzorek TZ (omletý)	1,000	1,000	0,998	0,105	0,003	0,004	1,000		0,893	0,311	0,002	0,004	1,000	1,000	0,384	0,791	0,000	0,000	1,000	1,000	0,671	0,435	0,002	0,001	0,996	1,000	0,337	0,271	0,001	0,001
9	f2	Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	0,226	0,998	1,000	1,000	0,531	0,645	0,657	0,893		1,000	0,441	0,608	0,763	0,961	1,000	1,000	0,137	0,117	1,000	0,999	1,000	1,000	0,421	0,293	1,000	1,000	1,000	1,000	0,275	0,372
10	f2	Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	0,026	0,755	0,999	1,000	0,980	0,994	0,138	0,311	1,000		0,959	0,991	0,143	0,357	1,000	1,000	0,752	0,704	0,985	0,786	1,000	1,000	0,952	0,879	1,000	0,972	1,000	1,000	0,863	0,931
11	f2	Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	0,000	0,012	0,128	0,999	1,000	1,000	0,001	0,002	0,441	0,959		1,000	0,000	0,001	0,434	0,139	1,000	1,000	0,062	0,013	0,711	0,897	1,000	1,000	0,156	0,048	0,948	0,973	1,000	1,000
12	f2	Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	0,000	0,022	0,212	1,000	1,000	1,000	0,001	0,004	0,608	0,991	1,000		0,001	0,002	0,628	0,247	1,000	1,000	0,109	0,025	0,853	0,966	1,000	1,000	0,255	0,085	0,987	0,995	1,000	1,000
13	f3	Vzorek TZ (neomletý)	1,000	1,000	0,994	0,033	0,000	0,001	1,000	1,000	0,763	0,143	0,000	0,001		1,000	0,127	0,499	0,000	0,000	1,000	1,000	0,455	0,231	0,000	0,000	0,986	1,000	0,159	0,118	0,000	0,000
14	f3	Vzorek TZ (omletý)	0,990	1,000	1,000	0,104	0,002	0,003	1,000	1,000	0,961	0,357	0,001	0,002	1,000		0,391	0,869	0,000	0,000	1,000	1,000	0,778	0,511	0,001	0,000	1,000	1,000	0,389	0,307	0,000	0,001
15	f3	Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	0,023	0,877	1,000	1,000	0,538	0,670	0,157	0,384	1,000	1,000	0,434	0,628	0,127	0,391		1,000	0,076	0,061	0,999	0,902	1,000	1,000	0,411	0,268	1,000	0,997	1,000	1,000	0,249	0,356
16	f3	Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	0,102	0,996	1,000	0,990	0,192	0,276	0,471	0,791	1,000	1,000	0,139	0,247	0,499	0,869	1,000		0,012	0,009	1,000	0,998	1,000	1,000	0,129	0,073	1,000	1,000	1,000	1,000	0,067	0,106
17	f3	Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	0,000	0,001	0,022	0,981	1,000	1,000	0,000	0,000	0,137	0,752	1,000	1,000	0,000	0,000	0,076	0,012		1,000	0,009	0,001	0,333	0,592	1,000	1,000	0,029	0,006	0,718	0,805	1,000	1,000
18	f3	Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	0,000	0,001	0,018	0,971	1,000	1,000	0,000	0,000	0,117	0,704	1,000	1,000	0,000	0,000	0,061	0,009	1,000		0,007	0,001	0,292	0,541	1,000	1,000	0,024	0,005	0,669	0,761	1,000	1,000
19	f4	Vzorek TZ (neomletý)	0,830	1,000	1,000	0,824	0,085	0,123	0,996	1,000	1,000	0,985	0,062	0,109	1,000	1,000	0,999	1,000	0,009	0,007		1,000	1,000	0,997	0,058	0,034	1,000	1,000	0,989	0,976	0,031	0,048
20	f4	Vzorek TZ (omletý)	0,992	1,000	1,000	0,424	0,019	0,029	1,000	1,000	0,999	0,786	0,013	0,025	1,000	1,000	0,902	0,998	0,001	0,001	1,000		0,979	0,889	0,012	0,007	1,000	1,000	0,812	0,739	0,006	0,010
21	f4	Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	0,098	0,971	1,000	1,000	0,793	0,877	0,390	0,671	1,000	1,000	0,711	0,853	0,455	0,778	1,000	1,000	0,333	0,292	1,000	0,979		1,000	0,690	0,540	1,000	1,000	1,000	1,000	0,516	0,638
22	f4	Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	0,044	0,867	1,000	1,000	0,941	0,975	0,211	0,435	1,000	1,000	0,897	0,966	0,231	0,511	1,000	1,000	0,592	0,541	0,997	0,889	1,000		0,884	0,771	1,000	0,993	1,000	1,000	0,750	0,849
23	f4	Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	0,000	0,011	0,119	0,999	1,000	1,000	0,001	0,002	0,421	0,952	1,000	1,000	0,000	0,001	0,411	0,129	1,000	1,000	0,058	0,012	0,690	0,884		1,000	0,147	0,044	0,940	0,968	1,000	1,000
24	f4	Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	0,000	0,006	0,073	0,993	1,000	1,000	0,000	0,001	0,293	0,879	1,000	1,000	0,000	0,000	0,268	0,073	1,000	1,000	0,034	0,007	0,540	0,771	1,000		0,091	0,026	0,858	0,909	1,000	1,000
25	f5	Vzorek TZ (neomletý)	0,565	1,000	1,000	0,968	0,205	0,281	0,945	0,996	1,000	1,000	0,156	0,255	0,986	1,000	1,000	1,000	0,029	0,024	1,000	1,000	1,000	1,000	0,147	0,091		1,000	1,000	0,999	0,084	0,124
26	f5	Vzorek TZ (omletý)	0,881	1,000	1,000	0,762	0,066	0,096	0,998	1,000	1,000	0,972	0,048	0,085	1,000	1,000	0,997	1,000	0,006	0,005	1,000	1,000	1,000	0,993	0,044	0,026	1,000		0,978	0,957	0,024	0,037
27	f5	Vzorek TZ + Nitridovaný (neomletý)	0,029	0,782	0,999	1,000	0,974	0,991	0,152	0,337	1,000	1,000	0,948	0,987	0,159	0,389	1,000	1,000	0,718	0,669	0,989	0,812	1,000	1,000	0,940	0,858	1,000	0,978		1,000	0,841	0,916
28	f5	Vzorek TZ + Nitridovaný (omletý)	0,021	0,705	0,998	1,000	0,988	0,997	0,117	0,271	1,000	1,000	0,973	0,995	0,118	0,307	1,000	1,000	0,805	0,761	0,976	0,739	1,000	1,000	0,968	0,909	0,999	0,957	1,000		0,897	0,952
29	f5	Vzorek TZ + Niklovaný (neomletý)	0,000	0,006	0,067	0,992	1,000	1,000	0,000	0,001	0,275	0,863	1,000	1,000	0,000	0,000	0,249	0,067	1,000	1,000	0,031	0,006	0,516	0,750	1,000	1,000	0,084	0,024	0,841	0,897		1,000
30	f5	Vzorek TZ + Niklovaný (omletý)	0,000	0,009	0,100	0,998	1,000	1,000	0,000	0,001	0,372	0,931	1,000	1,000	0,000	0,001	0,356	0,106	1,000	1,000	0,048	0,010	0,638	0,849	1,000	1,000	0,124	0,037	0,916	0,952	1,000	

Příloha 18: Nastavení okrajových podmínek testování vzorků

V případě frekvenčních testů na tribologickém standu se zatěžovací síla mohla reálně pohybovat do 60 N. Toto omezení zatěžující síly se ale neprokázalo být jako nijak zvlášť limitující z hlediska tvorby opotřebení.

Aby bylo zajištěno, že bude možné otestovat při stejných podmínkách všechny vzorky, bylo provedeno několik doplňujících testů pro nastavení okrajových podmínek, které byly následně použity v hlavním testování vzorků. Na tyto frekvenční testy pro nastavení okrajových podmínek byly vybrány válečky s povrchem zpevněným bezproudým niklováním a nitridací, které z předchozích testů vykazovali nejlepší hodnoty opotřebení => bylo potřeba nastavit okrajové podmínky tak, aby vzniklo opotřebení právě i na těchto válečkách.

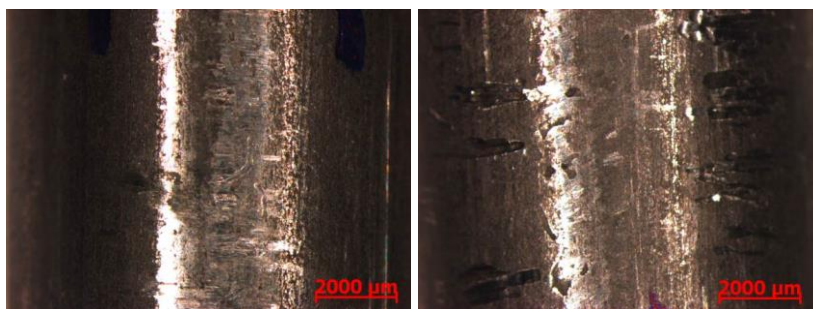
Proměnné:

- přítláčná síla,
- velikost posuvu (amplituda kmitu),
- frekvence,
- počet kmitů,
- mazání.

Test 1

Zátěžné podmínky:

- přítláčná síla 15 N,
- velikost posuvu $\pm 0,5$ mm,
- frekvence kmitů 50 Hz,
- počet kmitů: 60 000,
- bez mazání (nasucho).



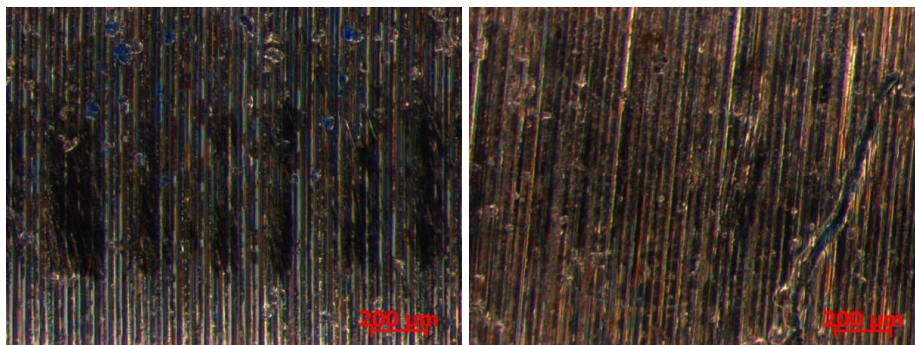
Obr. P- 55: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 1

Po vizuální analýze opotřebení byly další testy provedeny pro vyšší zatížení a vyšší počet a frekvenci kmitů.

Test 2

Zátěžné podmínky:

- přítláčná síla 60 N,
- velikost posuvu $\pm 0,1$ mm,
- rychlost kmitů 110 Hz
- počet kmitů: 1 386 000,
- s mazáním.



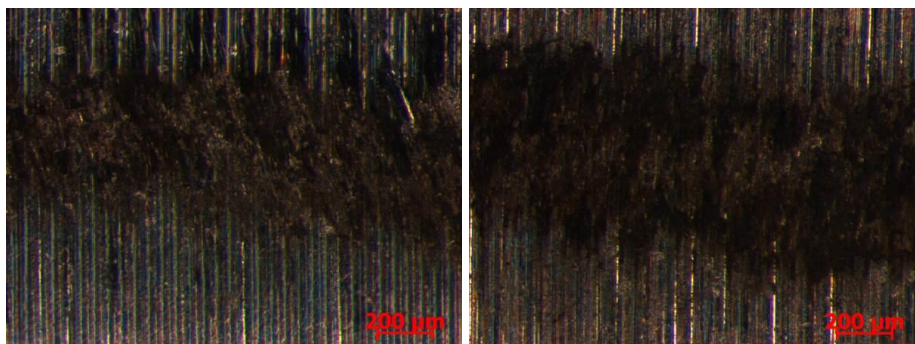
Obr. P- 56: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 2

Po vizuální analýze opotřebení, které bylo minimální, byl další test proveden bez mazání.

Test 3

Zátěžné podmínky:

- přítláčná síla 60 N,
- velikost posuvu $\pm 0,1$ mm,
- rychlost kmitů 110 Hz
- počet kmitů: 1 188 000,
- bez mazání (nasucho).



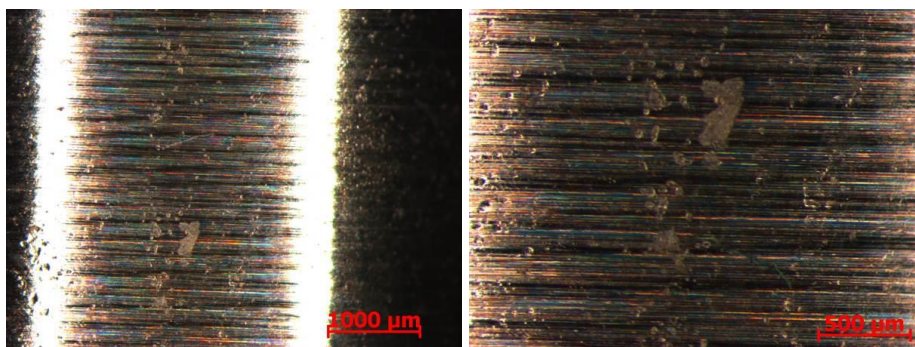
Obr. P- 57: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 3

Po vizuální analýze opotřebení bylo rozhodnuto další testy provést se sníženou frekvencí na 50 Hz s mazáním (test 4) i bez mazání (test 5).

Test 4

Zátěžné podmínky:

- přítláčná síla 60 N,
- velikost posuvu $\pm 0,2$ mm,
- rychlost kmitů 50 Hz
- počet kmitů: 1 188 000,
- s mazáním.

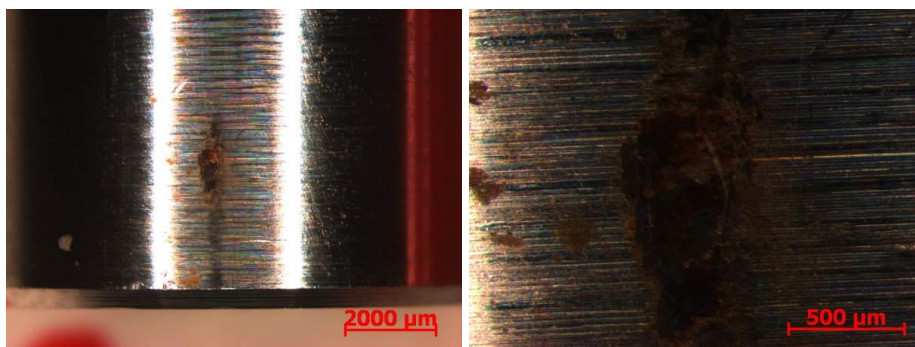


Obr. P- 58: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 4

Test 5 – test pro sníženou frekvenci na 50 Hz s i bez mazání

Zátěžné podmínky:

- přítláčná síla 60 N,
- velikost posuvu $\pm 0,2$ mm,
- rychlost kmitů 50 Hz
- počet kmitů: 1 188 000,
- bez mazání.

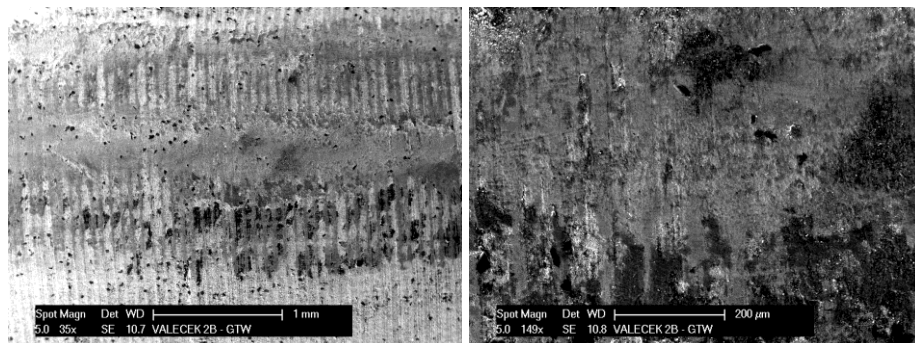


Obr. P- 59: Detail opotřebení horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 5

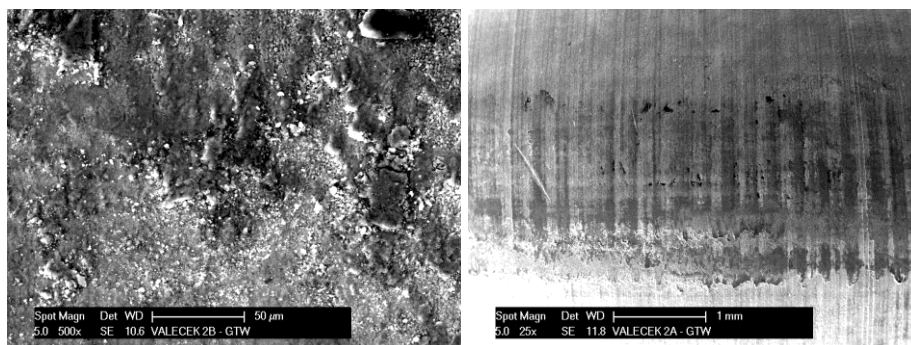
Test 6 – finální nalezení zátěžných podmínek

Zátěžné podmínky:

- přítláčná síla 15 N,
- velikost posuvu $\pm 0,2$ mm,
- rychlost kmitů 50 Hz
- počet kmitů: 1 000 000,
- bez mazání.



Obr. P- 60: Detail rozsáhlejší opotřebení o šířce 0,67 mm horního válečku (vlevo) vs. opotřebení spodního válečku (vpravo) po testu 6



Obr. P- 61: Vedle adhezních vrstev docházelo často také k zahlazení povrchu a stop po předchozím obrábění. Nikde nedošlo k poškození soudržnosti vrstvy nitridů

Z výše uvedených snímků vyplývá, že přestože byly použity "měkčí" parametry kontaktního namáhání (především síla), tak došlo k většímu poškození. Vzhledem k této skutečnosti, byly tyto okrajové podmínky vybrány pro hlavní testování vzorků.

Příloha 19: Výroba vahadel

Výroba vahadel probíhala převážně na lineárním frézovacím centru DMU 40eVo linear (Příloha 10). Strategie obrábění byly zvolena tak, že obrobek byl obroben na dvě upnutí a dále se nijak zámečnický neupravoval. K tomu byly přizpůsobeny i speciální upínací přípravky pro první i druhou pozici upnutí. Finální výška vahadla se měřila sondou s přesností 0,1 μ m. Výsledná přesnost (při započtení chyby v upnutí se pohybovala v rozmezí $\pm 0,01$ mm.

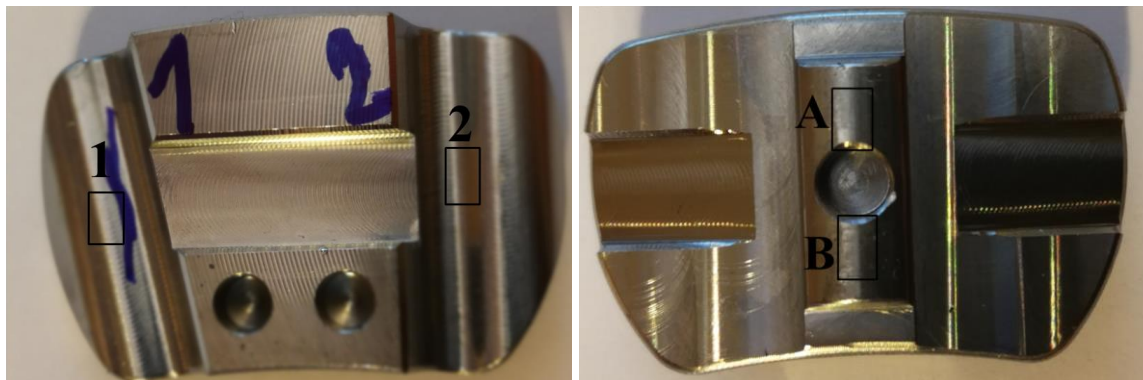


Obr. P- 62: Fotky z obrábění vahadel

Příloha 20: Snímky vyrobeného vahadla z ŘEM

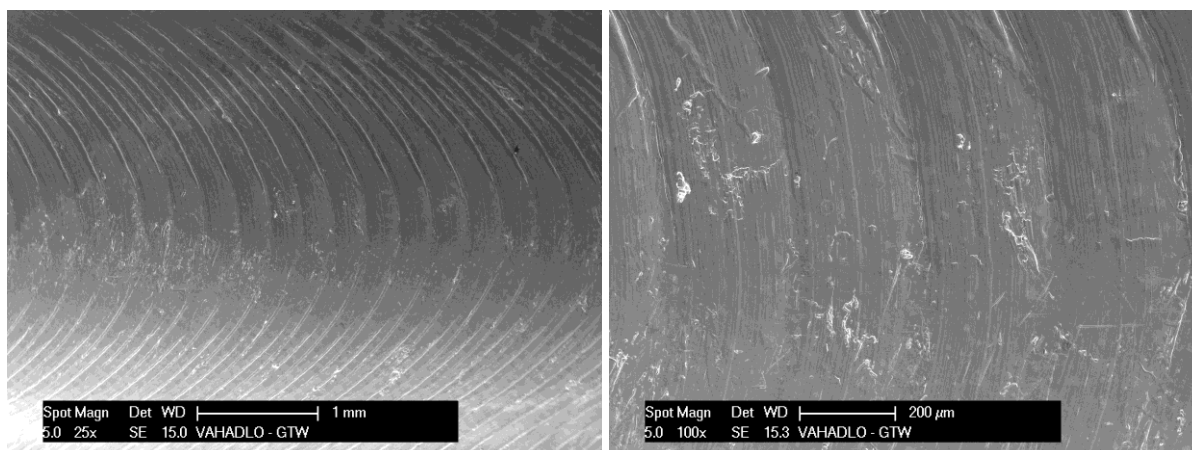
V této příloze je zachycen stav povrchu vahadla po obrobení (obr. P-48). Povrch byl zdokumentován pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu.

Dodaný segment (vahadlo) bylo podrobena dokumentaci povrchu. Snímky byly pořízeny z oblastí, které jsou vyznačeny na obr. P-48. Následující snímky dokumentují stav opracovaného (frézovaného povrchu) a to v oblastech 1; 2; A; B.

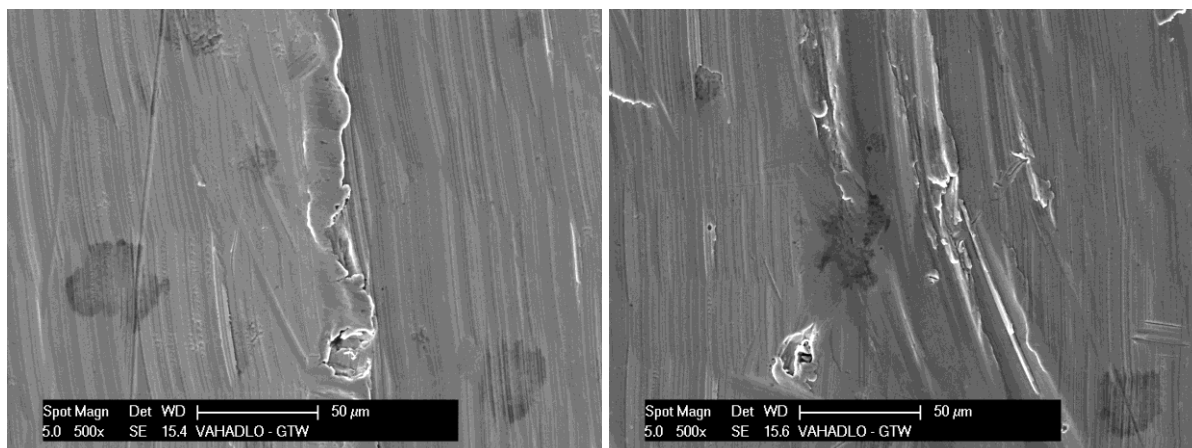


Obr. P- 63: Vahadlo ložiska – na snímku jsou vyznačeny oblasti povrchu, který byl zdokumentován pomocí řádkovacího

Následující snímky dokumentují oblast 1 a 2:



Obr. P- 64: Povrchový stav v místě 1 – zde při sesazení dojde ke kontaktu s protikusem (vlevo); detail oblasti snímku (vpravo)

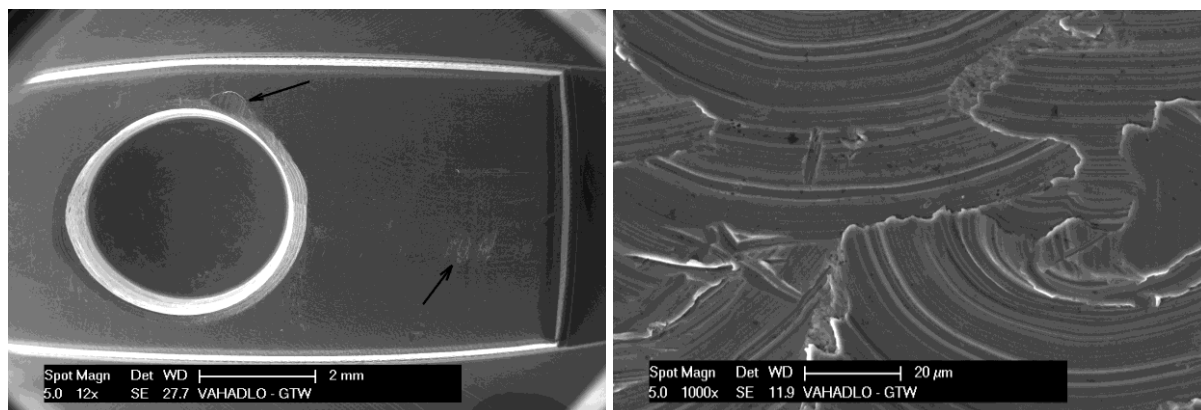


Obr. P- 65: Povrchový stav v místě 2 (vlevo); Povrchový stav v místě 2 – detail (vpravo)

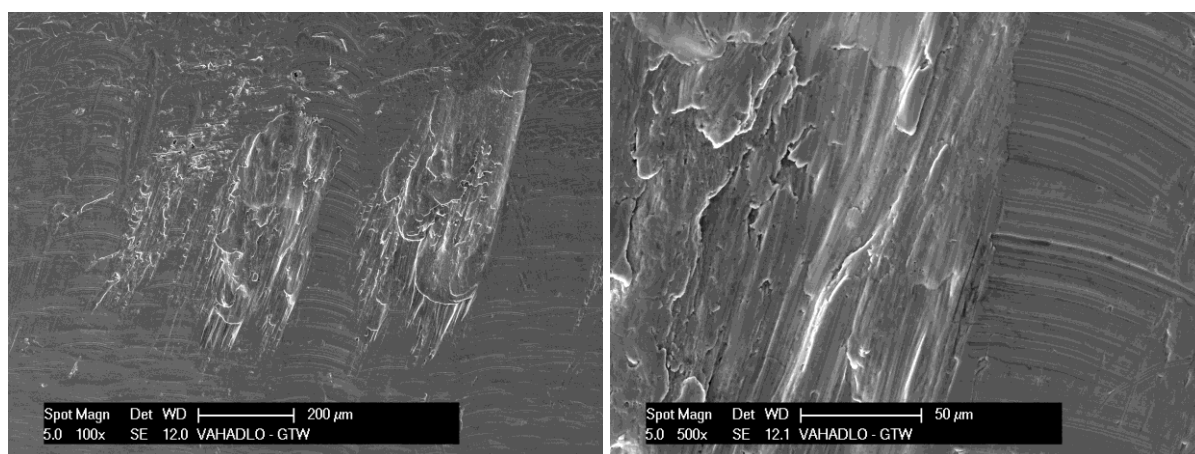
Povrchový stav v místě 1 – ještě větší detail oblasti z obr. P-49. Povrch byl frézován, proto v některých detailech je zachyceno „hrnutí“ materiálu. Tyto oblasti budou při kontaktu s protikusem zdrojem poškození.

Povrchový stav v místě 2 – detail z obr. P-50. Rovněž v této oblasti byly zachyceny stopy po obrábění (frézování), avšak také byly zachyceny další povrchové stopy, které pravděpodobně vznikly dodatečným kontaktem s neznámým tělesem. Obdobná situace je zachycena i na následujících snímcích z oblastí A; B.

Následující snímky dokumentují stav vahadla v oblasti A; B, tj. ve střední části vahadla – tato část bude rovněž v kontaktu s dalším protikusem.



Obr. P- 66: Kontaktní plocha vahadla. V blízkosti otvoru je zachycena otláčená oblast, rovněž v druhé oblasti je vidět poškození povrchu, které vzniklo v důsledku kontaktu s nějakým protikusem, a to i přestože je vahadlo nové. (vlevo). Detail obrobene plochy – je zachycen překryv jednotlivých stop po obrábění (vpravo)



Obr. P- 67: Detail poškozeného povrchu – jedná se o nový výrobek, proto toto poškození vzniklo v důsledku manipulace se vzorkem, popř. jako nechtěný kontakt povrchu s frézou (vlevo). Větší detail poškozeného povrchu (vpravo)

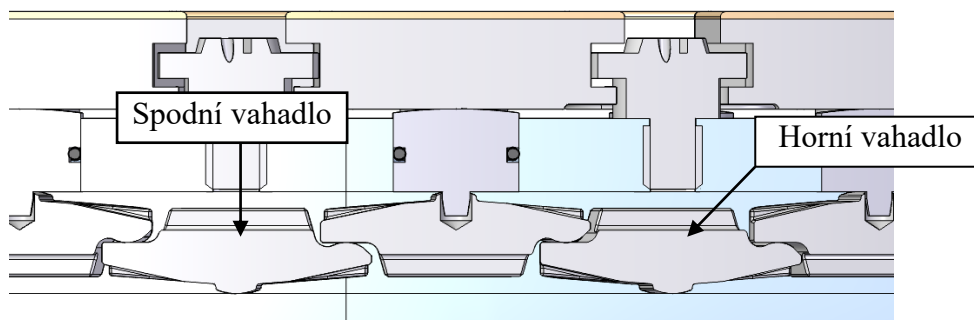
Jak vyplývá z předchozích snímků, v některých oblastech je zachyceno dodatečné poškození, které vzniklo nevhodnou manipulací, popř. nechtěného kontaktu s řezným nástrojem.

Výsledky potvrdily, že proces frézování má svoje limity a ty se projeví právě u těchto složitých tvarů. Dochází k vytrhávání materiálu, popř. dojde k jeho výrazné plastické deformaci v důsledku obrábění. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k experimentálnímu ověření tribologických vlastností i u reálných vahadel. (kap. 7.4.)

Příloha 21: Statický destruktivní test vahadel

Ustavení vahadla pro statický destruktivní test vahadel bylo identické jako v kapitole 7.4 (Obr. 162) Pro destruktivní testy byly vytypovány 3 velikosti vahadel, které mají dle současných zkušeností potenciál se nejvíce užívat v turbínách.

Pracovně byla vahadla označena jako „malá“, „střední“ a „velká“. Každá velikost lze dělit podle polohy použití v ložisku na „bez otvoru“ => spodní varianta v ložisku a na „s otvorem“ => horní varianta vahadla v ložisku – viz obr. P-53.



Obr. P- 68: Sestava vahadel

Staticky byly otestovány tyto varianty / velikosti vahadel:

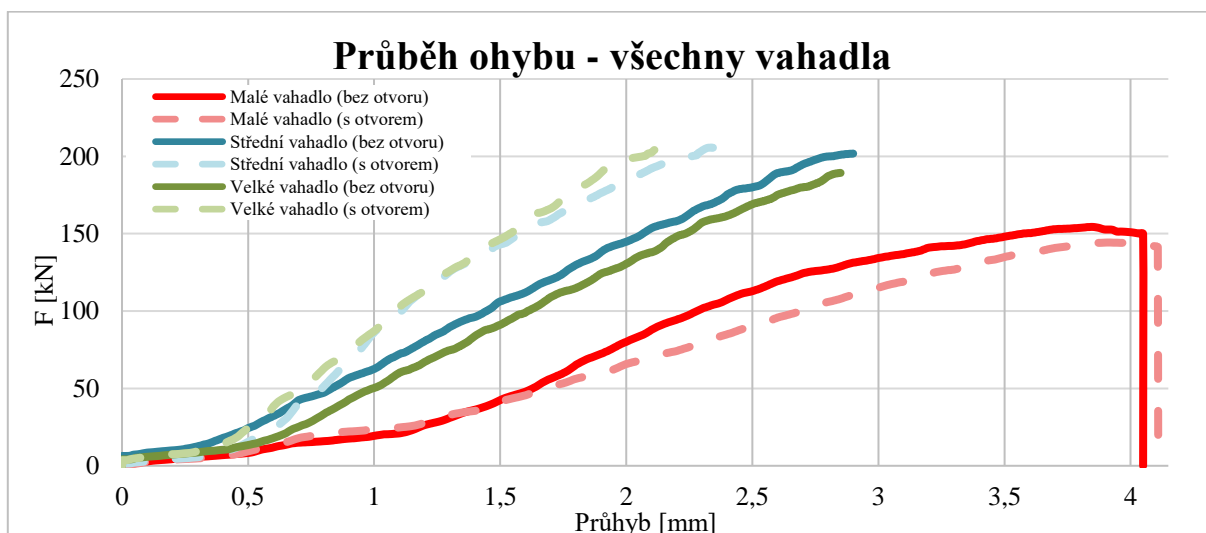
- „Malá“
 - a) s otvorem,
 - b) bez otvoru.
- „Střední“
 - a) s otvorem,
 - b) bez otvoru.
- „Velká“
 - a) s otvorem,
 - b) bez otvoru.

Z níže uvedeného grafu (obr. P-54) je patrné, že u střední a velké varianty si jsou tuhosti v ohybu hodně podobné, ač jsou vahadla velikostně docela dost rozdílná. Vytváří se v podstatě dvojice => Vahadlo s otvorem vs. Vahadlo bez otvoru (ale zase s postranním výfrezem). Je to dáno tvarovou podobností daných vahadel a proměnlivou velikostí ramen „křídélek“ na vahadlech => velké vahadlo se ohýbá na delším rameni (páce) a naopak.

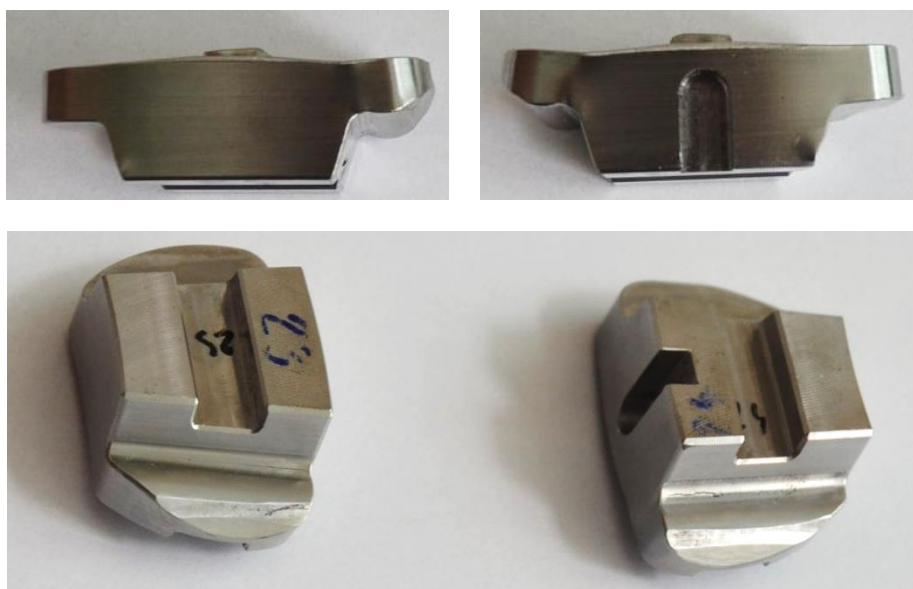
Z důvodu bezpečnosti byla vahadla testována pouze pro maximální zatížení 20 t. Vahadla u střední a velké velikosti se po ukončení zatížení vrátila do svého původního tvaru (ověřeno na granitové desce) => deformace u všech vahadel probíhala v oblasti pružných deformací.

Nejmenší vahadla již nebyla tak tuhá jako větší varianty a při cca 150-160 kN již došlo k plastické deformaci – viz fotky obr. P-55. Poté byl test přerušen, protože se vahadla vysmýkla z čelistí => svíslá čára dolů v grafu. Nominální zatížení na celé ložisko, kde je požita nejmenší varianta vahadel je maximálně ~130 kN => na jedno vahadlo to vychází <11 kN. Koeficient bezpečnosti je zde tedy více než 10-ti násobný.

Oproti větším velikostem vahadel je u malého vahadla varianta bez otvoru méně tuhá než varianta s otvorem. To je dáno relativně velkou drážkou z boku vahadla u varianty bez otvoru, která slouží pro fixaci vahadla kolíkem. Této nejmenší velikosti je poloha kolíku trochu níže než u jiných velikostí.



Obr. P- 69: Průběh ohybu – všechna vahadla

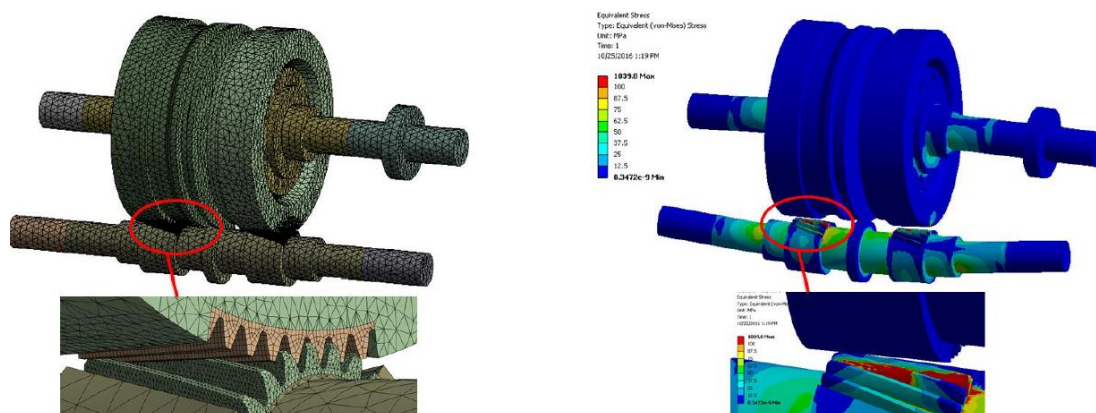


Obr. P- 70: Zdeformovaná vahadla – nejmenší velikost

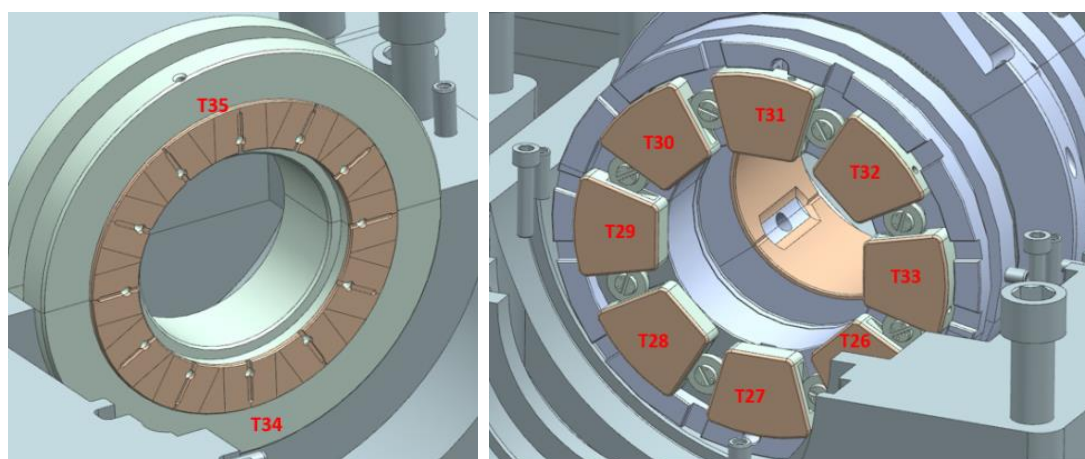
Diskuze nad výsledky

Tuhost vahadel se zdá být dostatečná - viz. maximální zatížení v grafu vs. nominální zatížení. U nejmenší varianty je rozdíl více než 10x a u větších vahadel dokonce není ani zjištělná. Přestalo se měřit po dosažení 200 kN, kdy se vahadla stále pohybovala v oblasti pružných deformací.

Příloha 22: Experimentální převodkový stand Howden ČKD Compressors a GTW BEARINGS



Obr. P- 71: FEM výpočet torzního předeplnění soustavy s uvažování kontaktu ozubení a vůlí ložisek



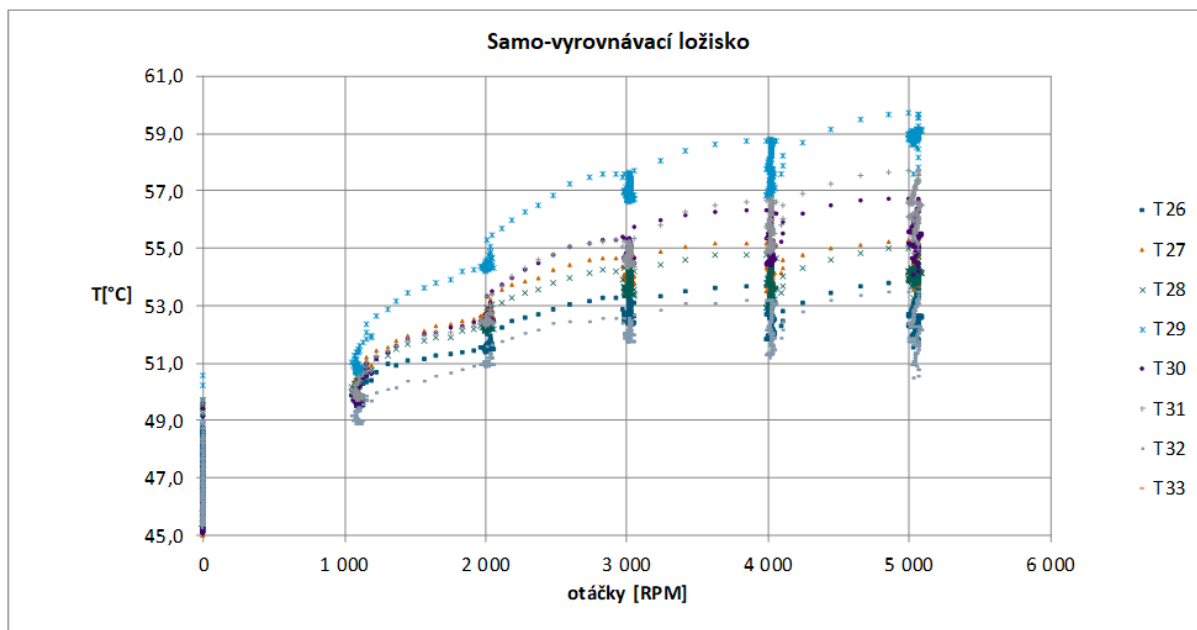
Obr. P- 72: Rozmístění termočlánků v ložisku

Během projektu proběhly (mimo jiných zkoušek) i zkoušky axiálních ložisek. Byly porovnány 3 typy ložisek: s pevným profilem, s naklápěcími segmenty (8 axiálních segmentů) a konečně nově vyvinuté ložisko se samo-vyrovnávacím vahadlovým systémem (8 axiálních segmentů). Obě ložiska s naklápěcími segmenty měli shodně segmenty na roztečné kružnici 115 mm.

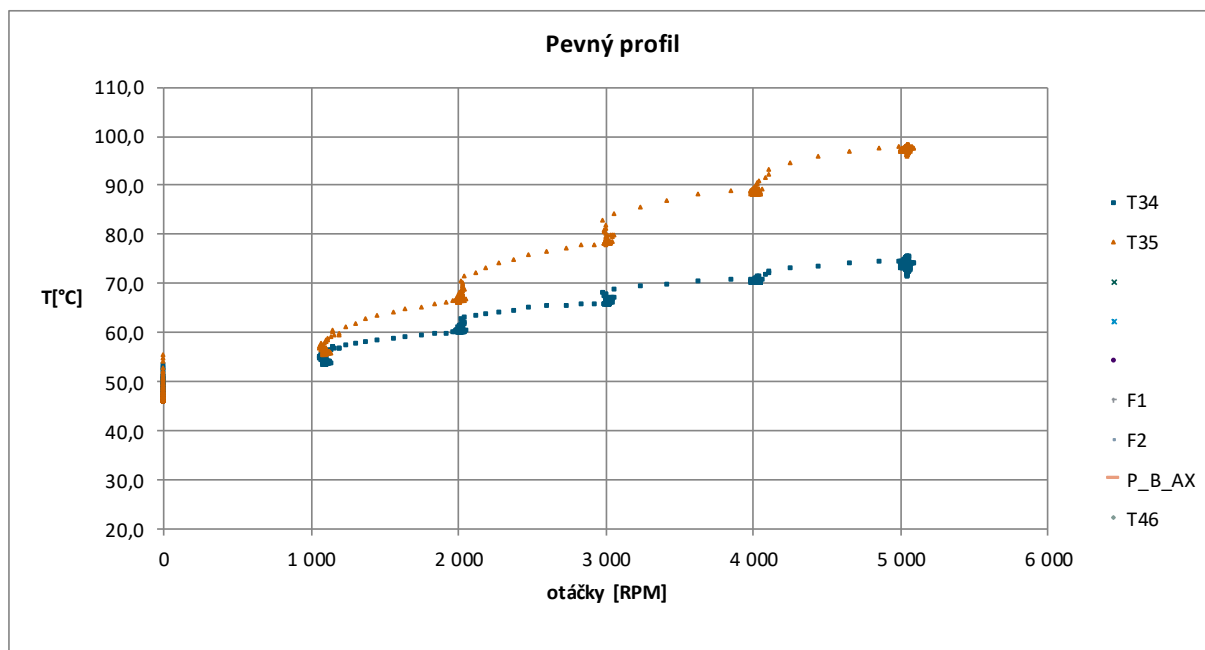
Teploty axiálních ložisek bez zatížení

V první fázi proběhly zkoušky provozu ložisek bez zatížení axiální silou. Ložiska byla osazena sadou teploměrů, viz schéma níže. Hlavním cílem bylo porovnání teplot měřených pod kompozicí pro jednotlivé typy ložisek.

Jak je patrné z grafů, ložisko s vyvažovacím systémem vahadel dosahuje za provozu výrazně nižších teplot kompozice než ložisko s pevnou geometrií.



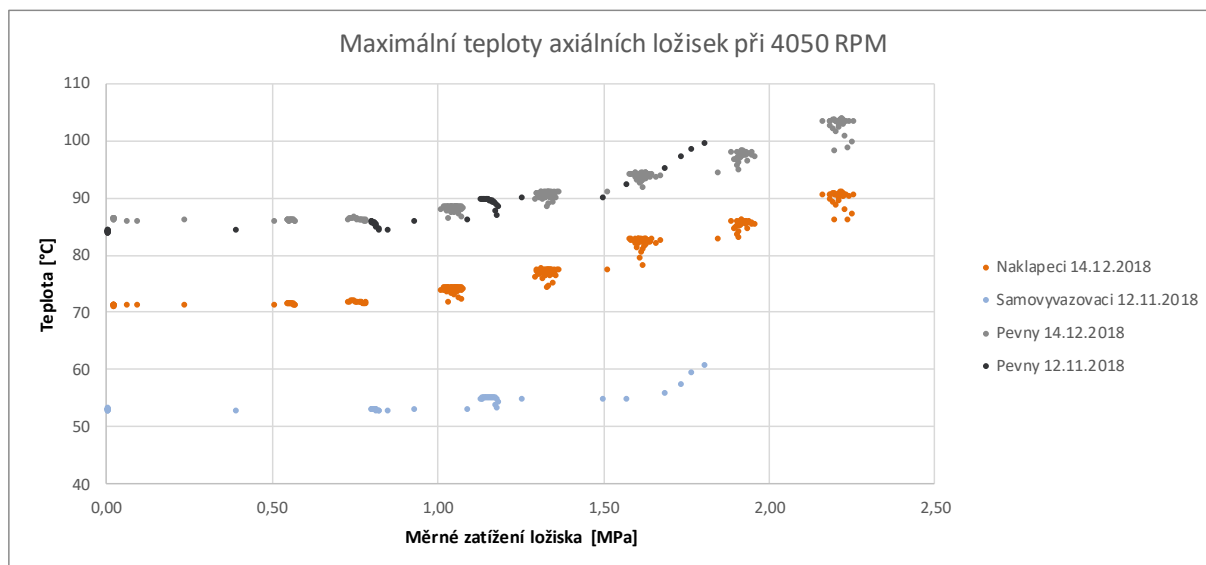
Obr. P- 73: Rozložení teplot u samo-vyrovnávacího ložiska bez zatížení v závislosti na otáčkách



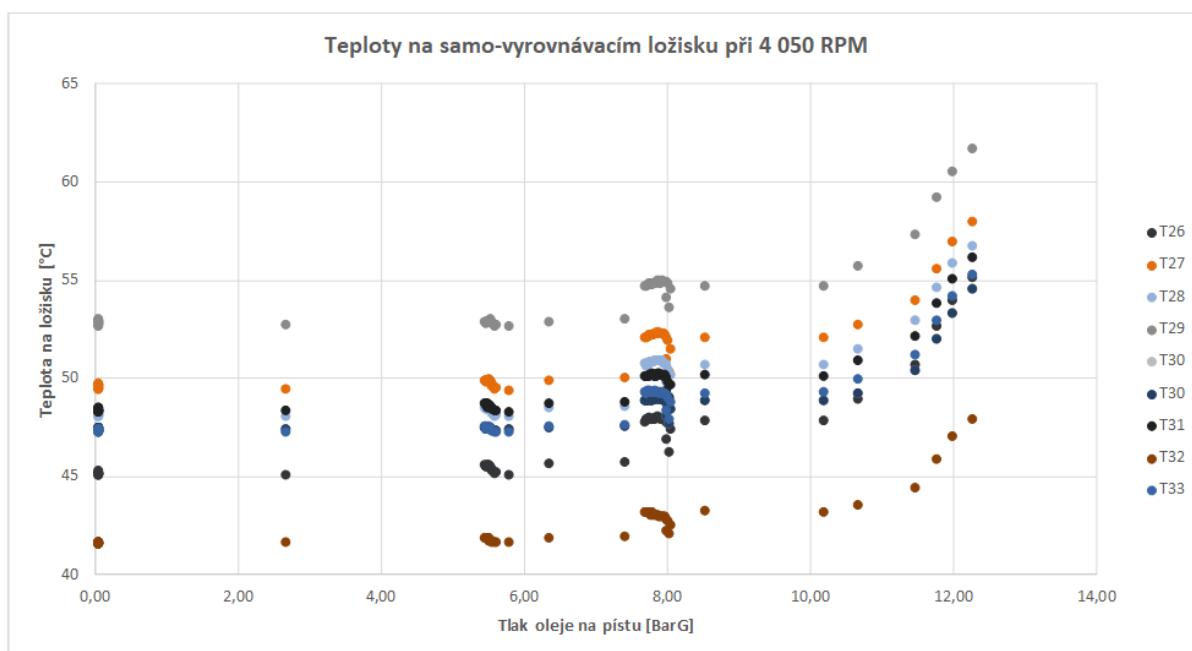
Obr. P- 74: Rozložení teplot u ložiska s pevným profilem bez zatížení v závislosti na otáčkách

Teploty axiálních ložisek pod zatížením

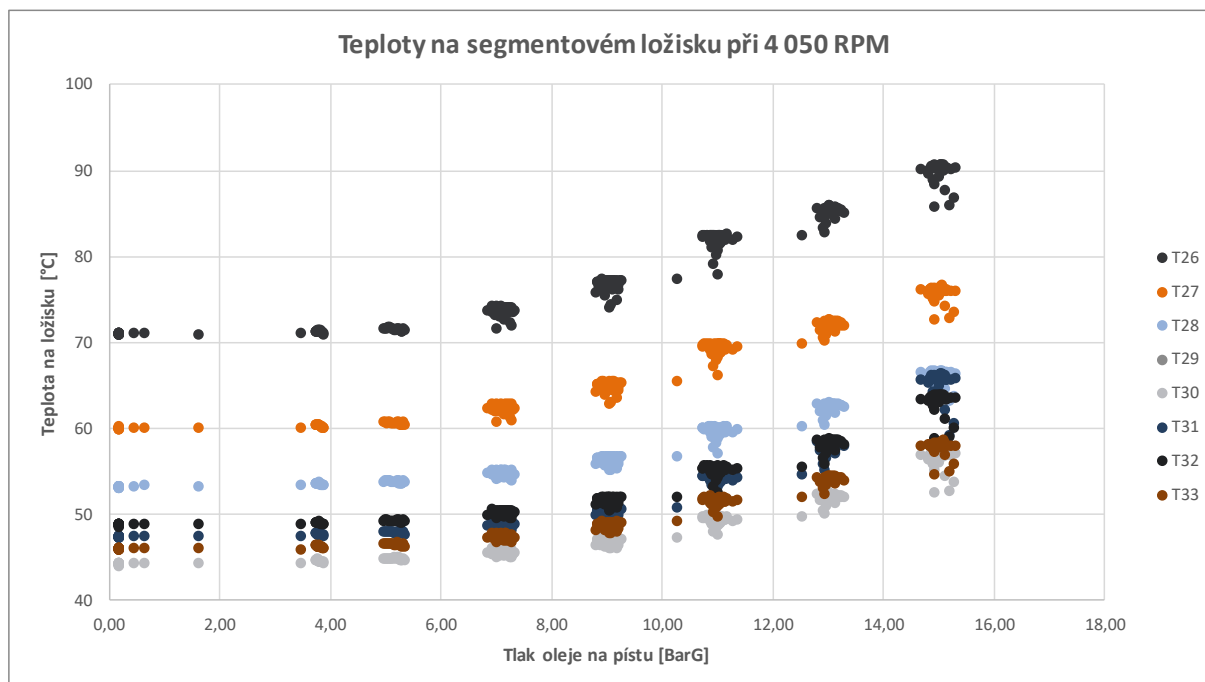
Zkoušky axiálních ložisek zahrnovaly také zkoušení v zatíženém stavu. Zkoušené ložisko bylo zatěžováno s pomocí hydraulického pístu. Nicméně dosavadní měření prokázalo nevhodnou konstrukci zatěžování ax. ložiska. Vlivem tření v o-kroužkách docházelo při měření k významné hysterezi, která ovlivňovala přesnost měření.



Obr. P- 75: Maximální teploty na všech axiálních ložiscích v závislosti na měrném zatížení ložiska



Obr. P- 76: Teploty na samo-vyrovňovacím ložisku v závislosti na měrném zatížení ložiska



Obr. P- 77: Teploty na konvenčním segmentovém ložisku v závislosti na měrném zatížení ložiska

Během zkoušek axiálních ložisek na experimentálním standu bylo zjištěno několik konstrukčních aspektů, které je nutné na zařízení do budoucna vylepšit. Nicméně se podařilo poměrně dobře porovnat mezi sebou jednotlivé konstrukce ložisek z hlediska dosahovaných teplot pod proměnnými zatíženími a rychlostmi. Pokud uvažujeme jako etalon ložisko s pevným profilem, použitím konvenčního ložiska s naklápěcími segmenty je možné snížit maximální teplotu v ložisku o cca 15 °C. Použitím nového typu ložiska s vyrovnávacími elementy došlo dokonce ke snížení teploty až o 40 °C při srovnatelné rychlosti a zatížení. Funkce vahadlového systému se projevila také v rovnoměrnosti teplot po obvodu (po segmentech), kdy maximální rozdíl teplot dosahoval 15 °C. U pevného, resp. segmentového ložiska je to 43 resp. 33 °C.

V kombinaci s možností měření síly pod segmenty se proto nový typ ložiska se samo-vyrovnávacím mechanismem jeví jako mimořádně vhodný pro použití v energetických zařízeních.